



Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

---

Facultad de Ciencias Físico Matemáticas

---

Observaciones Astrofísicas con HAWC

Tesis presentada al

**Posgrado en Física Aplicada**

como requisito parcial para la obtención del grado de

**MAESTRO EN CIENCIAS**

por

Francisco Javier Morales Hernández

asesorado por

Dr. Oscar M. Martínez Bravo

Puebla Pue.  
17 de marzo de 2015







Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

---

Facultad de Ciencias Físico Matemáticas

---

Observaciones Astrofísicas con HAWC

Tesis presentada al

**Posgrado en Física Aplicada**

como requisito parcial para la obtención del grado de

**MAESTRO EN CIENCIAS**

por

Francisco Javier Morales Hernández

asesorado por

Dr. Oscar M. Martínez Bravo

Puebla Pue.  
17 de marzo de 2015



**Título:** Observaciones Astrofísicas con HAWC

**Alumno:** FRANCISCO JAVIER MORALES HERNÁNDEZ

COMITÉ

---

Dr. Humberto Salazar Ibargüen  
Presidente

---

Dr. Arturo Fernández Tellez  
Secretario

---

Dr. J. Lorenzo Díaz Cruz  
Vocal

---

Dra. Patricia M. Hansen Nirich  
Vocal

---

Dr. Oscar M. Martínez Bravo  
Asesor



# Índice general

|                                                                 |           |
|-----------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. Astronomía de Rayos Gamma</b>                             | <b>5</b>  |
| 1.1. Introducción a la Astronomía de Rayos Gamma . . . . .      | 5         |
| 1.2. Fuentes TeV conocidas . . . . .                            | 5         |
| 1.2.1. La Nebulosa del Cangrejo . . . . .                       | 9         |
| 1.3. Chubascos de Rayos Gamma . . . . .                         | 11        |
| 1.4. Detectores de Rayos Gamma . . . . .                        | 13        |
| 1.4.1. Detectores espaciales . . . . .                          | 14        |
| 1.4.2. Detectores terrestres . . . . .                          | 15        |
| 1.5. Predecesores a HAWC . . . . .                              | 16        |
| <b>2. HAWC</b>                                                  | <b>23</b> |
| 2.1. El observatorio . . . . .                                  | 23        |
| 2.2. HAWC 111 . . . . .                                         | 26        |
| 2.3. Instrumentación . . . . .                                  | 26        |
| 2.4. Adquisición de Datos . . . . .                             | 29        |
| 2.5. Reconstrucción de Rayos Gamma . . . . .                    | 30        |
| 2.6. Reconstrucciones <i>online</i> . . . . .                   | 31        |
| <b>3. Datos y análisis de las observaciones</b>                 | <b>33</b> |
| 3.1. La muestra de datos . . . . .                              | 33        |
| 3.2. Programas de Análisis de datos: <i>Map-Maker</i> . . . . . | 34        |
| 3.3. Análisis de las observaciones . . . . .                    | 34        |
| 3.3.1. Significancia de una medición . . . . .                  | 36        |
| 3.4. Procedimiento de <i>Map-Making</i> . . . . .               | 36        |
| 3.5. Alineación cenital . . . . .                               | 37        |
| <b>4. Resultados</b>                                            | <b>39</b> |
| 4.1. Observaciones de la Nebulosa del Cangrejo . . . . .        | 39        |
| 4.2. Observaciones de Markarian 421 . . . . .                   | 48        |
| 4.3. Curvas de Luz . . . . .                                    | 56        |
| 4.4. Discusión de los resultados . . . . .                      | 60        |
| <b>5. Conclusiones</b>                                          | <b>63</b> |



*A mi familia,  
fuente de apoyo constante e incondicional en los momentos más difíciles.*

*A Sadia,  
por su amor incommensurable.*





# Resumen

Los rayos-gamma de alta energía pueden ser usados para estudiar todos los fenómenos astrofísicos más violentos hasta ahora conocidos en el universo, tal como los remanentes de supernova, Galaxias con Núcleo Activo, binarias interactuantes, púlsares y GRB's. El Observatorio HAWC (High Altitude Water Cherenkov Observatory) actualmente en construcción a 4100 m.s.n.m. en el Volcán Cerro La Negra en los límites entre Puebla y Veracruz, es el único instrumento sensible capaz de observar rayos-gamma de muy alta energía (0.1 TeV - 100 TeV). El observatorio en su etapa final consistirá de un arreglo de 300 detectores Cherenkov de agua (WDCs) y poseerá un gran campo de visión capaz de observar el cielo de forma continua.

En este trabajo se presentan resultados preliminares de las observaciones realizadas por HAWC en su primera etapa de operaciones científicas con 111 WDCs, en el periodo de Enero a Junio de 2014. La aplicación de nuevas herramientas de análisis en fase experimental, así como el acceso a nuevas tecnologías computacionales para el procesamiento masivo de datos (FENIX), ha permitido generar una colección de 320 mapas de todo el cielo con diferentes escalas de integración y distintos cortes de energía.

Los resultados revelan que los objetos más brillantes durante el primer semestre de 2014 son la Nebulosa del Cangrejo y la Galaxia con Núcleo Activo Markarian 421. Un exceso de  $6.2\sigma$  fue observado en la posición de la Nebulosa del Cangrejo, superando los 3 años de operación de MILAGRO, el antecesor de HAWC. La confirmación de la detección de la Nebulosa del Cangrejo y Markarian 421 por HAWC-111 indica que las configuraciones parciales del detector funcionan adecuadamente, incluso antes de la consumación del arreglo. Además de la detección de la Nebulosa del Cangrejo y Markarian 421, no se encontraron otras emisiones significativas en las posiciones de objetos ya catalogados como emisores TeV; la eventual consolidación del experimento mejorará la calidad de las observaciones. Finalmente, se presentan las curvas de luz semanales y mensuales de la Nebulosa del Cangrejo y de Markarian 421 para explorar la variabilidad de su emisión.

Este estudio contribuye a las tareas de validación de desempeño del detector y en la verificación de los algoritmos de reconstrucción y de análisis, además de que constituye uno de los primeros esfuerzos en el monitoreo de fuentes TeV notables.



# Capítulo 1

## Astronomía de Rayos Gamma

### 1.1. Introducción a la Astronomía de Rayos Gamma

La astronomía de rayos gamma o astronomía de altas energías, concierne al estudio de fuentes astrofísicas emisoras de fotones gamma, con energías entre  $\sim 30$  GeV y  $\sim 100$  TeV<sup>1</sup>. El rango TeV abre una nueva ventana del espectro electromagnético para el estudio del universo y comenzó con la identificación de la primer fuente, la Nebulosa del cangrejo [62]. Los resultados han sido impresionantes, con significativos avances en instrumentación que condujeron a la detección de más de 100 fuentes en la última década. Los objetivos de la astronomía TeV son de amplio alcance, pero en líneas generales, se puede describir como el estudio de los sitios de aceleración de partículas relativistas en el Universo, tanto hadrónicas y leptónicas. Esto abarca una amplia gama de escalas de tamaño y de energía, desde la actividad coronal del Sol, pasando por magnetósferas de púlsares individuales hasta interacciones entre cúmulos de galaxias.

### 1.2. Fuentes TeV conocidas

Aproximadamente el 1 % de todas las galaxias hospedan un núcleo activo; una región central compacta con una luminosidad muy alta. Alrededor del 10 % de estas Galaxias con Núcleo Activo (AGN) exhiben chorros relativistas, impulsados por acreción alrededor de un agujero negro súper

---

<sup>1</sup>Generalmente, la astronomía observacional de rayos-gamma puede ser dividida en 6 áreas: Low <baja> (LE: abajo de 30 MeV), High <alta> (HE: 30 MeV - 30 GeV), Very High <muy alta> (VHE: 30 GeV - 30 TeV), Ultra High <ultra-alta> (UHE: 30 TeV - 30 PeV) y finalmente, Extremely High <extremadamente alta> (EHE: arriba de 30 PeV) [11]

# CAPÍTULO 1. ASTRONOMÍA DE RAYOS GAMMA

## 1.2. FUENTES TEV CONOCIDAS

masivo. Según el Modelo Unificado de Galaxias [56], establece que todos los AGNs tienen la misma estructura interna y las características observacionales pueden ser atribuidas a la geometría del sistema; en particular, la orientación de los chorros con respecto al observador. Blázares, que albergan un chorro orientado en un ángulo cercano a la línea de visión, son de particular interés para la astronomía de rayos gamma, dado que la emisión de estos objetos es dominada por efectos electromagnéticos relativistas, que aumentan drásticamente la luminosidad y las energías de fotones observados.

La primer fuente extragaláctica descubierta a energías TeV fue Markarian 421 [49], un blazar de la subclase BL Lacertae. Actualmente, el catalogo TeV de fuentes extragalácticas comprende alrededor de 50 fuentes, y continua incrementándose lentamente.

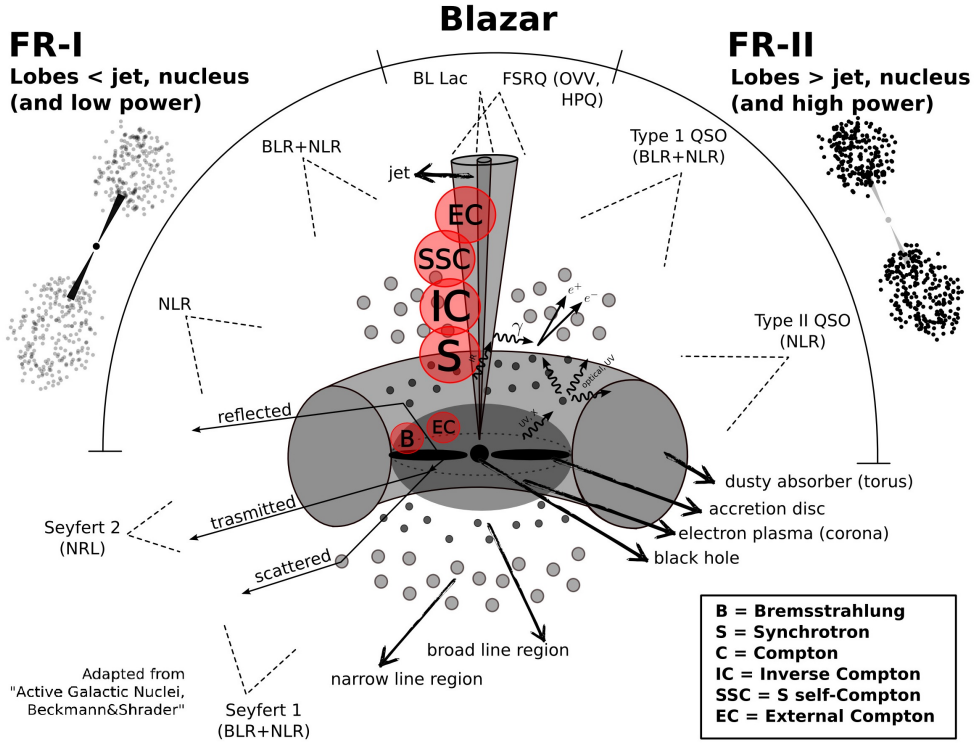


Figura 1.1: Esquema del modelo unificado para AGNs.

Los mecanismos que conducen la emisión en alta energía de los blázares permanece pobremente comprendido. Brevemente; en escenarios leptónicos, una población de electrones es acelerada a energía TeV, típicamente mediante aceleración de Fermi por choques en el chorro del AGN (ver figura 1.1). Estos electrones son enfriados por la emisión de fotones de rayos-X a través de radiación sincrotrón. Las emisiones TeV resultan de interacciones Compton inversas de los electrones con

sus fotones sincrotrón autogenerados o un campo de fotones externo. La fuerte correlación entre rayos-X y emisiones TeV la cual es frecuentemente observada, provee evidencia de un origen común, aunque existen contraejemplos [43]. Otro tipo de modelos tiene hadrones como la población de partículas primarias, los cuales pueden producir rayos-gamma TeV a través de interacciones subsecuentes con materia o campo de fotones. Modelos hadrónicos no son tan favorecidos, en parte porque los tiempos de enfriamiento para los procesos relevantes son largos, teniendo dificultades para explicar la rápida variabilidad. Una excepción a esto es el caso de la emisión sincrotrón por protones, que podría proveer una alternativa plausible, en la cual la emisión resultaría de protones extremadamente energéticos en regiones compactas del jet altamente magnetizadas [8]. Muchos de los AGNs detectados a energías TeV exhiben variabilidad extrema. Las escalas de tiempo pueden variar de años a minutos, y el flujo observado puede cambiar en más de un orden de magnitud. La rápida variabilidad puede ser usada para limitar el tamaño de la región de emisión [30]. La extremadamente rápida variabilidad de blázares distantes puede ser también usada para poner límites en la violación de la invarianza de Lorentz dependiente de la energía [22][38], como es predicha en algunos modelos de gravedad cuántica. La observación de blázares TeV también ha sido sugerida como prueba de otros fenómenos físicos, tal como generación, la aceleración y propagación de rayos cósmicos ultra energéticos (UHERC)[7] [29].

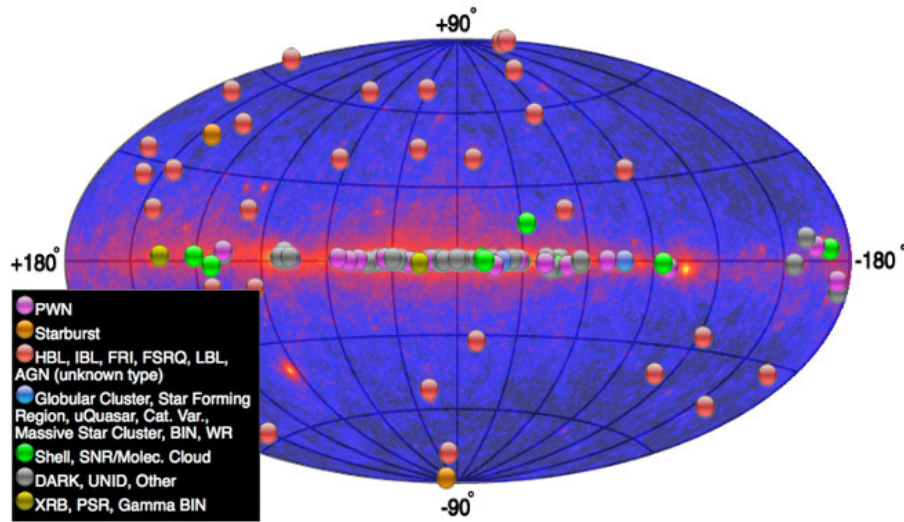


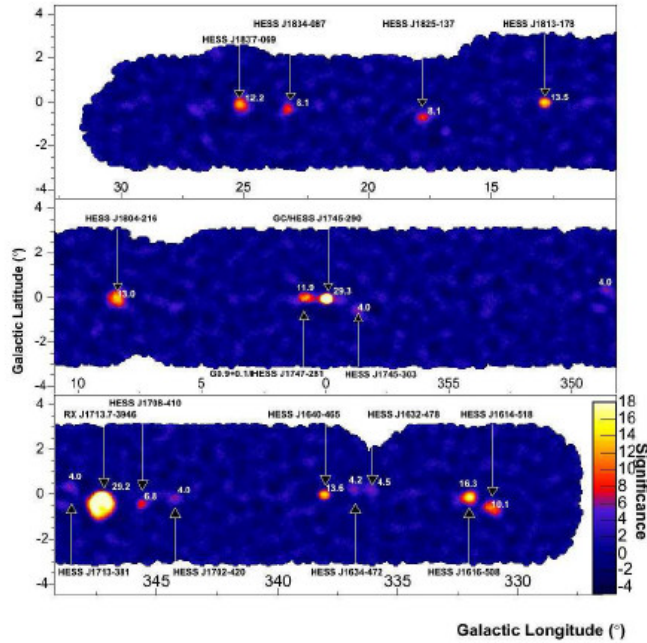
Figura 1.2: Distribución de fuentes de rayos gamma en el cielo según el Catalogo TeVCat. Un gran número de objetos identificados son fuentes galácticas. La imagen de fondo corresponde a las observaciones realizadas por el telescopio espacial FERMI-LAT. Los colores indican la naturaleza de la fuente.

# CAPÍTULO 1. ASTRONOMÍA DE RAYOS GAMMA

## 1.2. FUENTES TEV CONOCIDAS

Actualmente hay alrededor de 80 fuentes TeV conocidas dentro de nuestra galaxia, como lo indica su asociación con fuentes galácticas conocidas en otras longitudes de onda, o por su localización en el plano galáctico -un argumento especialmente convincente cuando se combina con una adecuada resolución angular. La mayoría de estas fuentes fueron identificadas por H.E.S.S. como emisores TeV durante el estudio del interior de la galaxia [12], ver figura 1.2.

H.E.S.S. es el único telescopio Cherenkov de imagen atmosférica (Imaging Atmospheric Cherenkov Telescope, IACT) actualmente operando en el hemisferio sur, lo cual permite observar el interior de la galaxia a elevaciones grandes y por lo tanto a bajos umbrales de energía. H.E.S.S. revelo que el plano galáctico está densamente poblado con fuentes TeV, principalmente agrupados en el intervalo de  $\pm 60^\circ$  en la longitud galáctica (Fig.1.3). Los estudios más recientes consisten de más de 2800 horas de observaciones, permitiendo la detección de más de 50 fuentes dentro del rango de coordenadas galácticas  $l = 280^\circ$  a  $60^\circ$  y  $b = -.35^\circ$  a  $3.5^\circ$  [24].



y/o periódicas.

### 1.2.1. La Nebulosa del Cangrejo

La Nebulosa del Cangrejo (M1 o NGC 1952) es uno de los objetos celestes más intensamente estudiados en astrofísica y aún continua sorprendiéndonos. Este objeto relativamente cercano ( $\sim 6300$  años luz), es el remanente de la explosión de una supernova registrada por astrónomos chinos en el año de 1054. El fenómeno astronómico fue observable en el cielo a simple vista por algunos días durante la plenitud del día y por los siguientes dos años durante la noche. La Nebulosa del Cangrejo, es un prototipo de nebulosa impulsada por el viento de un Pulsar (PSRB0531 + 21), donde la energía de rotación perdida por el pulsar conforme este gira, se trasfiere a la nebulosa. El aporte de energía del pulsar, el cual emerge en forma de un viento de campo magnético y partículas relativistas ha inflado una burbuja de fluido relativista. Como el giro del pulsar es bastante regular, la tasa de entrada de energía es bastante estable, aunque ésta decrece lentamente. Una razón importante para monitorear la nebulosa del Cangrejo a altas energías, surgió cuando se descubrió que el Cangrejo emite ráfagas de rayos-gamma [16]. Varias de éstas ráfagas han sido observadas y se ha encontrado que la emisión de fotones a energías mayores a 100 MeV se incrementa en un factor mayor a dos en cuestión de días [23][53]. Estas ráfagas no son bien comprendidas, pero ellas probablemente implican materia moviéndose a velocidades relativistas.

La Nebulosa del Cangrejo y el Pulsar asociado a ella, juegan un papel histórico en el desarrollo de la astronomía TeV: el nacimiento del campo como una disciplina puede ser remontado a la detección del Cangrejo en el régimen TeV realizada por Trevor Weekes usando el telescopio Whipple de 10 metros, en la primer aplicación de la técnica de telescopios Cherenkov atmosféricos (IACTs) [62]. Subsecuentemente, el Cangrejo ha servido como una fuente de radiación TeV de referencia.

Como se menciona arriba, el Cangrejo se ha utilizado como una fuente de emisión estándar en la astronomía TeV, en el supuesto que su emisión es estable. Esto ahora es demostrablemente falso, al menos a energías bajas  $\sim 1$  GeV, con la detección de múltiples eventos de ráfaga en la escala de días [53][4], y la variación a largo plazo en el régimen de rayos X duros [64]. El espectro GeV durante las ráfagas indica que la emisión es atribuida a la componente sincrotrón, una conclusión que es soportada por la rápida variación de los eventos (ya que el tiempo de enfriamiento del efecto Compton Inverso o Bremsstrahlung de los electrones emitidos es mucho más grande que la duración de las ráfagas observadas).



Figura 1.4: Nebulosa del Cangrejo en la constelación de Tauro. La composición de imágenes incluye datos de tres telescopios de la NASA: en azul, datos del *Chandra X-ray Observatory*, rojo y amarillo, imágenes ópticas del *Hubble Space Telescope* y en violeta, imagen del *Spitzer Space Telescope* [48].

Entre octubre de 2009 y abril de 2011, el sistema estereoscópico MAGIC colectó 69 horas de observación de la Nebulosa de Cangrejo [9]. El análisis de ésta muestra ha proporcionado una precisión sin precedentes en la determinación de la curva de luz y el espectro diferencial de los rayos gamma de ésta fuente astrofísica en el rango de 50 GeV hasta 30 TeV 1.5. En este estudio no se encontró ninguna indicación de la variabilidad del flujo integral en escalas diarias a energías superiores a 300 GeV, cuando se tienen en cuenta las incertezas sistemáticas de la medición. MAGIC observó la Nebulosa del Cangrejo simultáneamente durante episodios de ráfaga reportadas por Fermi-LAT pero no se detectó un aumento en la actividad de la Nebulosa por encima de los 300 GeV (fig. 1.6).

A altas energías, ARGO-YBJ ha mostrado algunas evidencias de un aumento en el flujo durante los episodios de ráfaga y existe una posible correlación con las observaciones realizadas por el telescopio espacial FERMI-LAT [61]. Sin embargo, como se mencionó antes, las mediciones realizadas



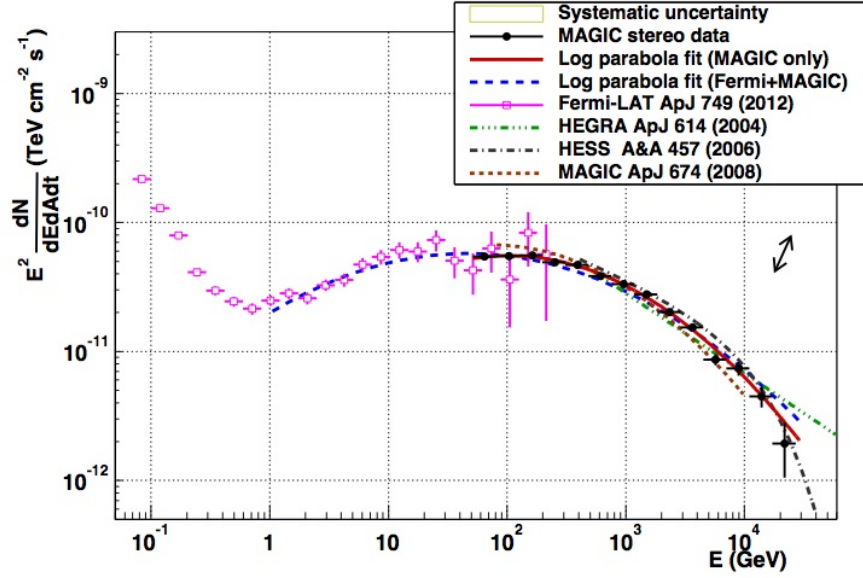


Figura 1.5: Distribución espectral de energía de la Nebulosa del Cangrejo de 100 MeV a 30 TeV obtenida por Fermi-LAT y el MAGIC, junto con resultados de otros experimentos de rayos gamma.

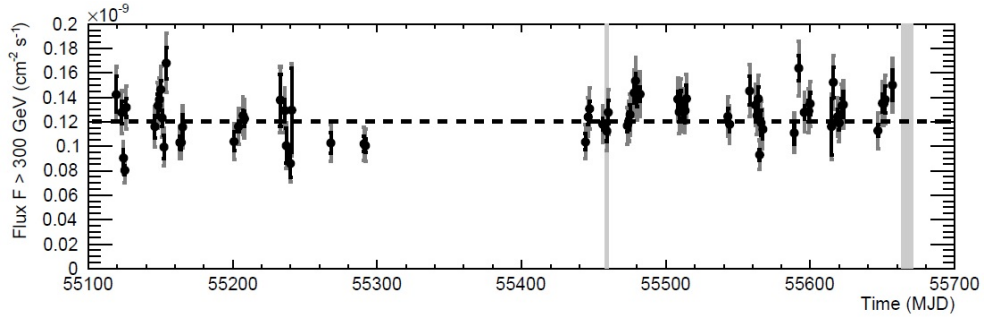


Figura 1.6: Curva de luz de la Nebulosa del Cangrejo para energías superiores a 300 GeV. La línea horizontal punteada es el mejor ajuste a un flujo constante. Las áreas en gris indican ráfagas del Cangrejo reportadas por Fermi-LAT.

por IACTs no corroboran estos resultados; pero no están en conflicto, dada la diferencia en los ciclos de operación. Se requieren mediciones más detalladas con IACTs y detectores de partículas durante futuras etapas de ráfaga para resolver está interrogante.

### 1.3. Chubascos de Rayos Gamma

Cuando un rayo gamma de muy alta energía incide en la Tierra produce en la alta atmósfera chubascos atmosféricos extensos (Extensive Air Shower, EAS), los cuales se propagan a altitu-

## CAPÍTULO 1. ASTRONOMÍA DE RAYOS GAMMA

### 1.3. CHUBASCOS DE RAYOS GAMMA

des bajas. De acuerdo al modelo de Hillas [39] para un EAS iniciado por fotón, un rayo gamma inicial interactúa con un núcleo atómico en la atmósfera a una altitud de 10-20 km y crea un par electrón-positrón muy energético. El electrón radia por frenado (bremsstrahlung) y deposita aproximadamente la mitad de su energía en rayos gamma secundarios los cuales subsecuentemente producen pares y continua el ciclo. Este proceso de repetida producción de pares seguida de bremsstrahlung forman una cascada electromagnética, diluyendo rápidamente la energía del rayo gamma primario en un gran número de electrones y positrones relativistas, y rayos gamma secundarios (véase la Figura 1.7). Eventualmente la energía media de las partículas llega a ser lo suficientemente baja que los efectos de ionización y excitación comienzan absorber electrones y positrones de la cascada. El máximo de la cascada ocurre cuando el numero de partículas en la cascada alcanzan su valor más alto justo antes que los efectos de absorción comiencen a dominar. La forma de la EAS puede ser descrita cualitativamente como una delgada tortilla de partículas normal a la dirección de rayo gamma inicial, con un angosto núcleo de partículas relativamente energético y un borde extendido de partículas de baja energía. El tamaño real de la EAS depende fuertemente de la energía de la partícula primaria y de cuantas longitudes de radiación ( $X$ ) se han desarrollado a través de la cascada.

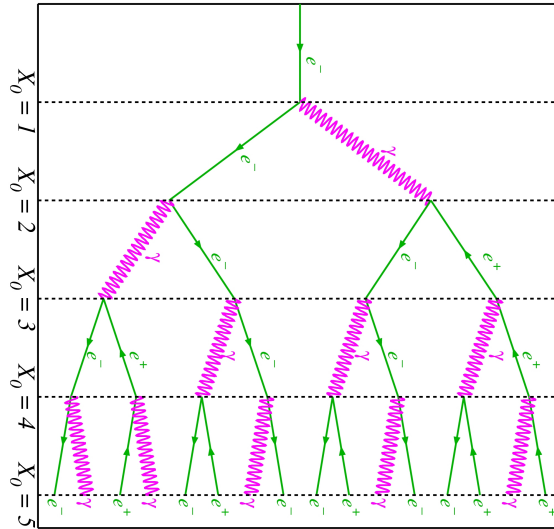


Figura 1.7: Desarrollo de una cascada atmosférica extensa, mostrando las generaciones de partículas y la iteración de bremsstrahlung y producción de pares.

El observatorio HAWC usa la técnica Cherenkov de agua para identificar EAS y reconstruir la

dirección de la partícula primaria. HAWC consiste de un arreglo de grandes tanques contenedores de agua (Ver. Capítulo 2) instrumentado con tubos fotomultiplicadores. Cuando el frente de partículas relativistas del EAS entra en el agua, las partículas cargadas exceden la velocidad de la luz local y producen radiación Cherenkov en el azul y cercano ultravioleta. En HAWC, el agua actúa como un convertidor y un medio de detección; partículas cargadas entran en el agua e inmediatamente radian luz Cherenkov, mientras que rayos gamma secundarios producen un electrón y un positrón que radian Luz Cherenkov. Esto permite a HAWC detectar casi todas las partículas incidentes en el detector, y reduce significativamente el umbral de energía del experimento.

Una de las grandes ventajas de la técnica Cherenkov de agua es la habilidad para detectar componentes cargados y neutros de la EAS. Detectores tradicionales de EAS están basados en técnicas de detección sensibles a componentes cargadas de un EAS.

Uno de los principales problemas que enfrentan todos arreglos detectores de EAS es la diferenciación de eventos de rayos gamma del abrumador fondo de eventos de rayos cósmicos.

EAS iniciadas por núcleos de rayos cósmicos tienen características que pueden distinguirlas de aquellas EAS iniciadas por rayos gamma. En particular, EAS iniciadas por partículas hadrónicas contienen un numero significativo de muones a nivel del suelo y tienen una forma de racimos debido al alto momento transversal de piones y mesones producidos en la cascada hadrónica 1.8, mientras que EAS generadas por un rayo gamma tienen una concentración compacta. Estas características son usadas parcialmente para remover el fondo hadrónico.

## **1.4. Detectores de Rayos Gamma**

El flujo de rayos gamma de fuentes celestes es bajo y decrece rápidamente con la energía. Como resultado, para la detección de fotones TeV se necesita un instrumento con una gran área efectiva para realizar astronomía de rayos gamma. Como el tamaño de los satélites es limitado, no es posible observar el flujo de rayos gamma más allá de GeV, No obstante, es posible abordar el estudio de rayos gamma cósmicos indirectamente en la superficie de la Tierra y evitar el exorbitante costo de construir un telescopio de grandes dimensiones.

Hay dos amplias categorías de detectores de rayos-gamma cósmicos: terrestres y espaciales, cada uno con diferentes técnicas de detección.

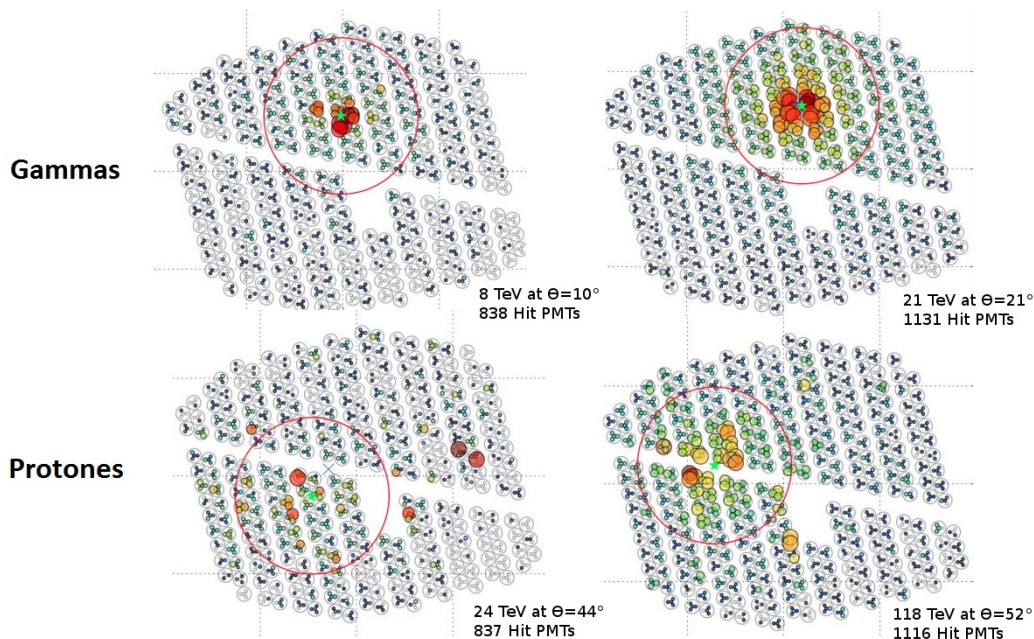


Figura 1.8: Comparación de eventos inducidos por rayos gamma y protones detectados por HAWC. EAS son identificadas mediante el patron de energía depositada en el detector. EAS inducidas por rayos gamma exhiben concentraciones compactas mientras que EAS inducidas por protones depositan grandes cantidades de energía en distintos racimos lejos del núcleo del EAS (Dingus, B. 2014).

#### 1.4.1. Detectores espaciales

Los detectores espaciales vuelan en satélites y globos aerostáticos a gran altitud. Los detectores espaciales tiene tres componentes básicas: un cámara de rastreo, un calorímetro y un contador de anti-coincidencia. La cámara de rastreo es usada para registrar el camino de partículas cargadas en el detector. Las trazas son usadas para reconstruir la dirección de fotón gamma incidente mediante la identificación de pares electrón-positrón que resultan de la aniquilación de este fotón gamma. El calorímetro determina la energía del fotón incidente mediante la medición de la longitud de camino integrado de las partículas en la cascada electromagnética producida por el fotón incidente (fig.1.9).

El contador de anti-coincidencia rechaza activaciones causadas por partículas cargadas las cuales son usualmente protones, núcleos pesados y electrones. Los detectores espaciales tienen excelente eliminación del ruido de fondo, lo que permite identificar de forma inequívoca rayos gamma. Ellos tienen un alto ciclo de trabajo que permite el monitoreo continuo de fuentes transitorias a lo largo de todo el año. Una ventaja más de los detectores espaciales sobre los terrestres es su alta

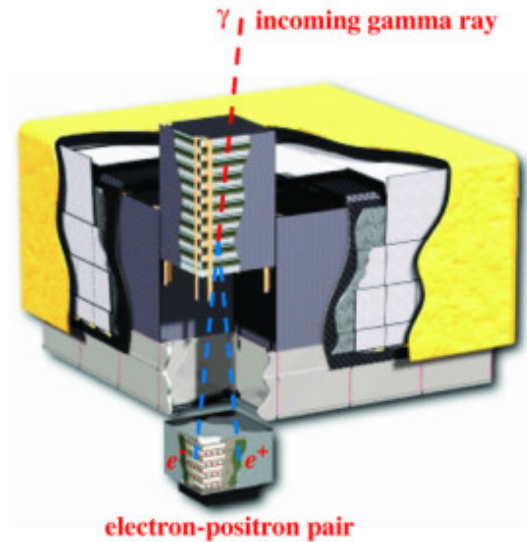


Figura 1.9: Cámara de rastreo y calorímetro del telescopio espacial FERMI-LAT.

exposición. Ellos pueden ver el cielo completo en cuestión de horas a diferencia de los detectores terrestres que pueden ver únicamente la mitad del cielo ya que la otra mitad se encuentra bloqueada por la Tierra. A pesar de todas estas ventajas, los detectores satelitales tienen resolución angular limitada, usualmente del orden de un grado. Esto hace difícil correlacionar fuentes observadas con detectores satelitales a aquellos observados en otras longitudes de onda. A diferencia de los detectores terrestres, los detectores espaciales tienen un área de detección pequeña, del orden de  $1 \text{ m}^2$ . Esto limita el rango de energía de estos instrumentos; de algunos MeV a varios GeV.

Los observatorios espaciales han jugado un rol especial en la astronomía de rayos gamma. A bajas energías (100 MeV) el instrumento EGRET a bordo del *Compton Gamma Ray Observatory* en la década de los 90s detectó arriba de 270 fuentes de rayos gamma [34]. Desde 2008, FERMI-LAT (20MeV a 300 GeV) sucesor de EGRET, ha detectado alrededor de 1500 fuentes [25].

#### 1.4.2. Detectores terrestres

Un instrumento ubicado en la superficie terrestre, tendría restricciones para la detección de fotones gamma, ya que la atmósfera es opaca a fotones de muy alta energía. Sin embargo, existe una alternativa; la interacción de fotones gamma con la atmósfera produce partículas secundarias que pueden ser estudiadas y empleadas para determinar las propiedades del fotón inicial. Esto se logra mediante la detección de partículas secundarias en un chubasco atmosférico que alcanzan la Tierra o por la detección de luz Cherenkov producida por estas partículas cuando ellas se propagan

a través de la atmósfera.

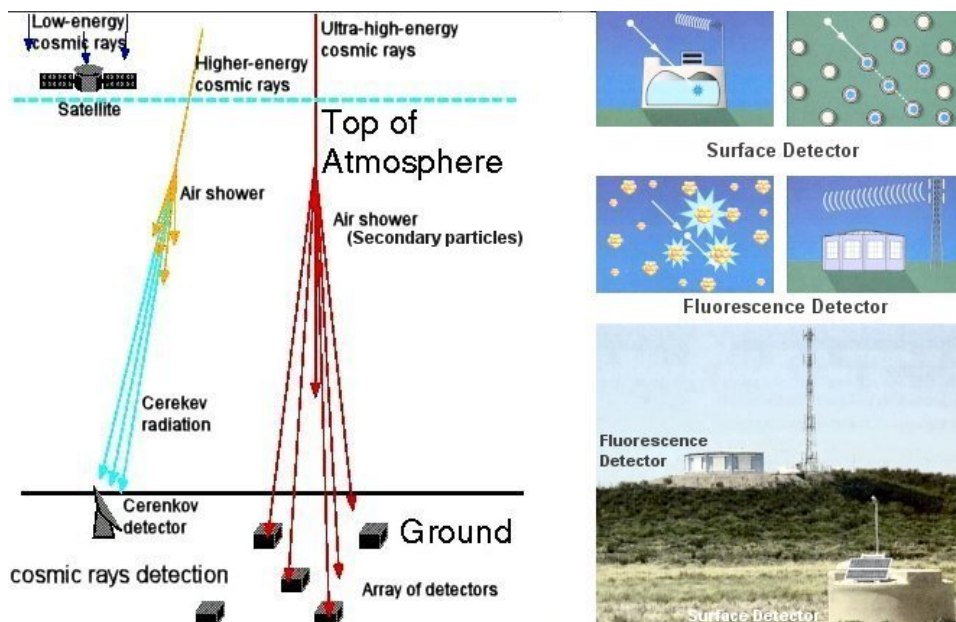


Figura 1.10: Detectores de rayos cósmicos

Una principal desventaja de los detectores terrestres de rayos gamma es el enorme fondo de rayos cósmicos. Los rayos cósmicos, consisten de protones y núcleos pesados, que están constantemente golpeando la atmósfera. Estos rayos cósmicos producen un chubasco atmosférico que son superficialmente similares a aquellos producidos por fotones y son aproximadamente 10000 veces más numerosos que un fotón incidente. Este gran fondo hadrónico limita la sensibilidad de los detectores terrestres hace muy difícil observar la señal de una fuente de rayos gamma.

## 1.5. Predecesores a HAWC

La detección directa de chubascos atmosféricos de partículas usando arreglos de detectores de partículas a nivel del suelo ofrece algunas ventajas importantes sobre la técnica de telescopios Cherenkov atmosféricos (IACTs). En particular, las observaciones pueden realizarse de manera continua, tanto de día como de noche y con un amplio campo de visión. Sin embargo, estas ventajas son descompensadas por la baja capacidad para resolver fuentes puntuales, que es causada principalmente por la dificultad de rechazar el fondo de rayos cósmicos iniciado por chubascos atmosféricos. La resolución angular de éstos detectores es del orden de medio grado de arco, en comparación con los minutos de arco que poseen los IACTs. Los primeros reportes de emisión de



## CAPÍTULO 1. ASTRONOMÍA DE RAYOS GAMMA

### 1.5. PREDECESORES A HAWC

---

sistemas binarios empleando detectores de partículas, no fueron confirmados sino hasta la década de los 90s. Instrumentos más sensibles (por ejemplo, CASA-MIA [47] y HEGRA [10]), indicaron la necesidad de un nuevo enfoque para resolver el problema de rechazo del fondo de rayos cósmico. *Milagro*, que funcionó entre 2000 y 2008 en las montañas Jemez al norte de Nuevo México ( $36^{\circ}\text{N}$ ,  $107^{\circ}\text{W}$ ), fue el primer intento exitoso.

El detector *Milagro* empleaba la técnica Cherenkov de agua para detectar chubascos atmosféricos a energías mayores a 1 TeV. El experimento consistió de un gran reservorio de agua ( $60\text{m} \times 80\text{m} \times 8\text{m}$ ) a una altitud de 2630 metros, cubierto con una barrera hermética a la luz, e instrumentado con 723 tubos fotomultiplicadores (PMTs).



Figura 1.11: Vista exterior del detector Milagro

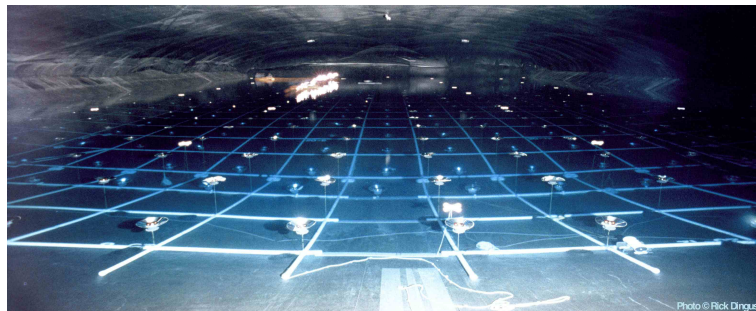


Figura 1.12: Interior de Milagro

El depósito central de agua, proporcionaba un muestreo en alta resolución de las partículas de la chubasco atmosférico en un área relativamente pequeña (en comparación con la huella de la chubasco).

En 2004, se añadió un arreglo de 175 pequeños tanques estabilizadores “outriggers”, irregularmente repartidos en un área de  $200 \times 200 \text{ m}$  alrededor del depósito central. Esta configuración



Figura 1.13: Vista aérea de Milagro con los outriggers

junto con el desarrollo de técnicas de análisis para la discriminación de rayos cósmicos de fondo, proporcionaron suficiente sensibilidad para que el primer estudio exhaustivo del cielo TeV del norte.

Los resultados mostraron fuertes detecciones de las fuentes TeV conocidas; Markarian 421 y la Nebulosa del Cangrejo, junto con la detección de tres fuentes extendidas en el plano galáctico, cada uno con flujos integrados comparables a la Nebulosa del Cangrejo a 20 TeV.

Algunas fuentes candidatas menos significativas también fueron identificadas en el plano, y un nuevo análisis tras el lanzamiento de *Fermi*-LAT, mostró correlación con catorce fuentes galácticas observadas por Milagro [3]. La figura 1.14 muestra los resultados de Milagro para la región alrededor del plano galáctico.

Milagro cesó operaciones en 2008; Sin embargo, dos grandes arreglos con detectores de partículas continuaron en operación a una gran altitud; ARGO-YBJ y  $AS\gamma$ .

ARGO-YBJ es un detector de chubascos atmosféricos extensos que ha sido usado para monitorear el cielo a energías arriba de 3 TeV. Localizado a 4300 m en Yangbajing, Tibet, consiste de un arreglo de 130 estaciones con contadores de placa resistiva (Resistive Plate Counters, RPCs) que cubren una área de 110 x 100 m [15]. El resultado de 1670 días de observación son presentados en [20], mostrando detecciones  $> 5\sigma$  de la Nebulosa del Cangrejo, Markarian 421 y dos fuentes Milagro. El experimento  $AS\gamma$ , también en Yangbajing [59], consiste de  $\sim 750$  detectores centelleadores estrechamente espaciados que cubren un área de 36 900 m<sup>2</sup>, ha demostrado que esta técnica también es práctica para la detección de fuentes brillantes TeV [14].

El campo de la astronomía de rayos gamma con observatorios terrestres se ha expandido significativamente los últimos 10 años, pero vale la pena señalar que los observatorios que operan



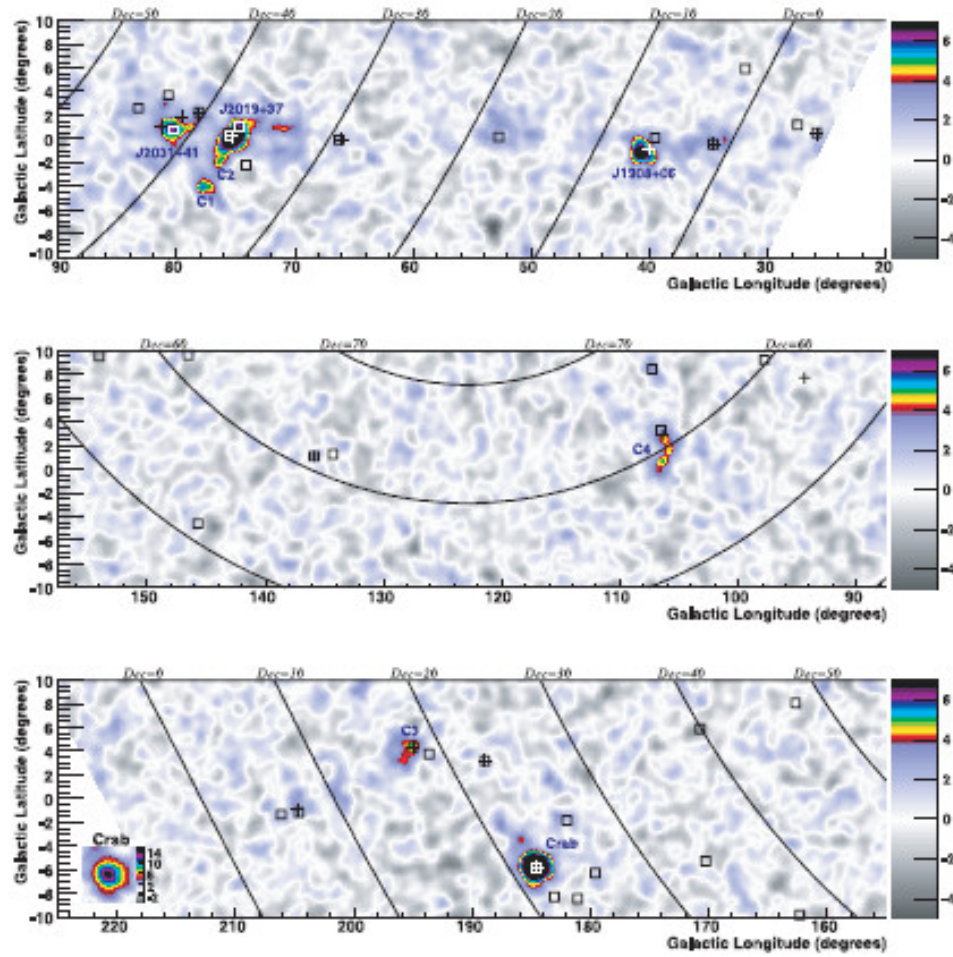


Figura 1.14: Mapa de significancia del plano galáctico observado por milagro. El máximo valor positivo del código de color se satura a  $7\sigma$ , aunque tres fuentes son detectadas con mucho más alta significancia estadística

actualmente están lejos de alcanzar los límites físicos de las técnicas de detección.

La experiencia obtenida en Milagro probó que un detector Cherenkov de agua con mayor área física y optimizado para reconstruir chubascos atmosféricos producidos por rayos gamma, puede proveer finas observaciones en un extenso rango de energías TeV. Para la detección de partículas, la próxima generación en instrumentación es HAWC (High Altitude Water Cherenkov Observatory). Emplazar el observatorio a una altitud mayor a 4000 metros sobre el nivel del mar, permitirá estar cerca del máximo de un EAS generado por fotones TeV, de este modo, se incrementa la respuesta a bajas energías y se mejora la sensibilidad, resolución angular y el rechazo del ruido de fondo.

Dado que el flujo de rayos gamma decrece con el incremento de la energía, entonces una gran

# CAPÍTULO 1. ASTRONOMÍA DE RAYOS GAMMA

## 1.5. PREDECESORES A HAWC



(a) Interior del laboratorio ARGO-YBJ



(b) Vista aérea del experimento AS- $\gamma$

área efectiva y grandes tiempos de integración son requeridos para detectar rayos cósmicos de alta energía. El área efectiva de HAWC es comparable a la de los IACTs, sin embargo, HAWC observa una fuente en el cielo por 1500 horas al año. Los IACTs típicamente observan fuentes por  $\sim 50$  horas. Como se ve en la figura 1.16, a energías arriba de  $\sim 0.6$  TeV, la sensibilidad de HAWC en un año es mejor que la sensibilidad de 50 horas de observación de HESS o VERITAS de una sola fuente.

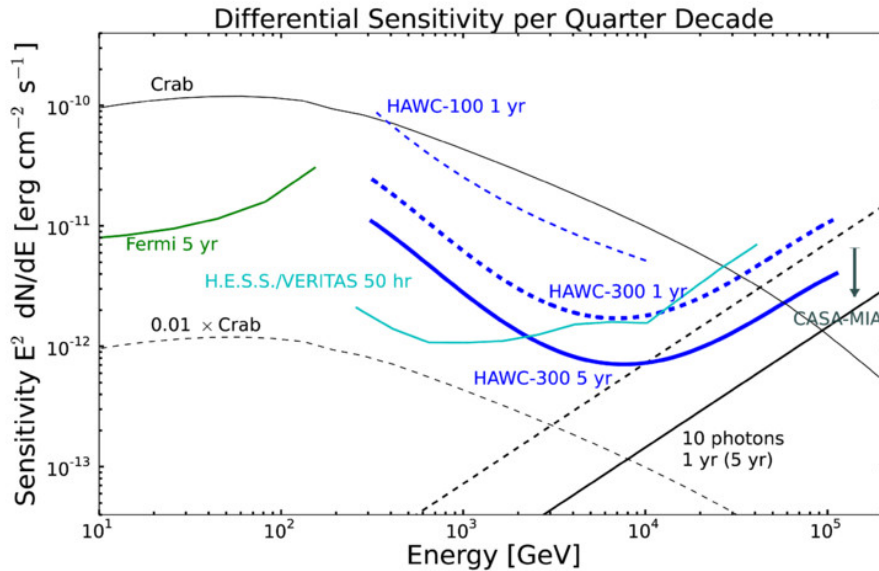


Figura 1.16: Sensibilidad de HAWC comparada con otros experimentos.

Podemos concluir que la Astronomía de altas energías ahora describe una amplia disciplina, que abarca un extenso rango de tópicos astrofísicos. Con planeados desarrollos experimentales, no

es irrazonable exceder la catalogación de 1000 fuentes dentro de la próxima década. Mucho del cielo TeV permanece relativamente inexplorado. Menos de 10 % del cielo ha sido observado a 1 TeV y la sensibilidad a eventos transitorios y fuentes extendidas a estas energías es muy baja. La probabilidad de encontrar resultados prometedores es alta, tanto para fuentes conocidas como para nuevos descubrimientos.



## Capítulo 2

# HAWC

### 2.1. El observatorio

El observatorio HAWC (*High Altitude Water Cherenkov*) es un arreglo de detectores de rayos gamma de muy alta energía . Su diseño de última generación y mediante la técnica Cherenkov de agua, permite observar chubascos atmosféricos extensos producidos por rayos gamma y rayos cósmicos en el régimen de energía de 50 GeV a 100 TeV.



Figura 2.1: HAWC visto desde la ladera del Volcán Sierra Negra el 25 de Septiembre de 2014

El experimento se actualmente en construcción en una ladera entre los volcanes Sierra Negra





Figura 2.2: Construcción de los tanques de acero del Observatorio HAWC.

y Pico de Orizaba en el estado de Puebla, México, a una altitud de 4100 m.s.n.m. Esta mayor proximidad al máximo de la cascada generada por fotones TeV, permite en comparación a Milagro, ver el doble de partículas en una cascada a la misma energía y tener un umbral de detección a menor energía. El sitio del experimento está localizado en  $18^{\circ}59'48''\text{N}$  y  $97^{\circ}18'34''\text{O}$ , esto permite observaciones de  $2/3$  del cielo (restringido a observaciones dentro de un cono de  $45^{\circ}$  del cenit local). Con su amplio campo de visión del cielo (entre  $-26^{\circ}$  y  $64^{\circ}$  de declinación) y ciclo de trabajo cercano al 100 %, HAWC debe tener una exposición diaria a la Nebulosa del Cangrejo, el pulsar Geminga, Mrk 421, Mrk 501 y la región del Cisne. HAWC debe también ser capaz de alcanzar el centro galáctico a  $46^{\circ}$  del cenit.

En su configuración final, HAWC será un arreglo de 300 tanques cilíndricos de acero de 7.3 m de diámetro y 4.5 m de altura (fig. 2.2), cubriendo un área instrumentada de  $22000 \text{ m}^2$  (fig. 2.4).

La finalización del observatorio está planeada para la primavera de 2015. Su construcción y operación es un esfuerzo bi-nacional de una colaboración de científicos de más de 20 instituciones de Estados Unidos y México, entre ellas, la Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas de la BUAP.

Antes de la producción de los detectores de HAWC, se probó el concepto y diseño en el sitio con un pequeño prototipo de ingeniería. El arreglo prototipo llamado VAMOS (Verification And Measuring of Observatory Systems), consistió de seis tanques y operó continuamente desde el 1 de

octubre de 2011 hasta mayo del 2012 [1].



Figura 2.3: Construcción del prototipo VAMOS

La localización del prototipo con respecto a HAWC se muestra en la figura 2.4. La experiencia con este prototipo fue útil para validar el funcionamiento a gran altitud, pero también para optimizar y finalizar el diseño de los diferentes componentes de los detectores.

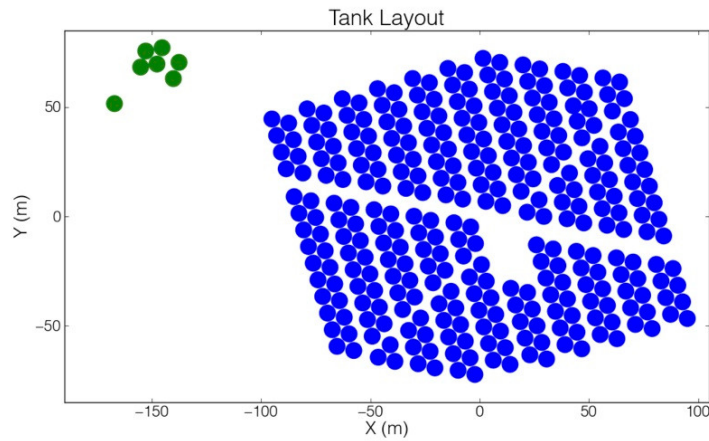


Figura 2.4: Posición relativa de los 300 tanques de HAWC. La posición vacía en el centro del arreglo corresponde a la posición del centro de control que alberga la electrónica (counting house). Los siete tanques en la parte superior izquierda corresponden a VAMOS.

## 2.2. HAWC 111

El diseño modular de HAWC hizo posible iniciar la toma de datos a finales de 2012 con los primeros 30 tanques (HAWC-30), cada uno con su respectiva instrumentación. La detección de la sombra de Luna verifico la precisión de apuntado del arreglo. El número de tanques a crecido desde entonces y las operaciones científicas comenzaron oficialmente en agosto de 2013 con 111 WCDs (Fig. 2.5). La motivación de poner en funcionamiento esta configuración, descansa en verificar que todos los sistemas del observatorio funcionan adecuadamente y que los resultados obtenidos se apeguen a las predicciones realizadas en la simulación del experimento. La confirmación de que todo funciona como se espera, es la detección de una señal en la posición de objetos TeV notables. Desde el inicio de operaciones de HAWC-111, el instrumento ha acumulado un conjunto de datos que suficiente para realizar un monitoreo continuo del cielo. Mientras la toma de datos continua, conjuntos de nuevos WCDs serán añadidos en los meses posteriores hasta completar el arreglo de 300 tanques a finales de 2015.

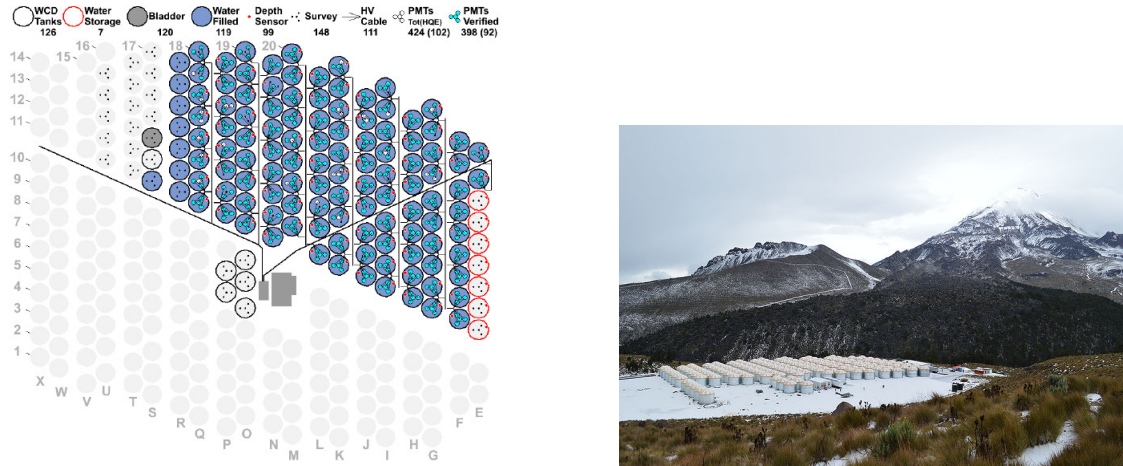


Figura 2.5: Estado de la construcción de HAWC-111 (izq.) al 8 de Agosto de 2013 . La fotografía a la derecha muestra el arreglo al 21 de octubre de 2013.

## 2.3. Instrumentación

El diseño de HAWC parte de la experiencia con el detector Milagro. El diseño de HAWC utiliza una capa de tubos fotomultiplicadores (PMTs) con una separación angosta. Esta configuración da a HAWC un área efectiva mucho más grande que Milagro por la misma área de los foto-cátodos. Otra importante diferencia con respecto a Milagro es que a pesar de una gran piscina, el observatorio



HAWC consiste en un gran arreglo modular de detectores Cherenkov de agua. El soporte estructural de los detectores es provisto por tanques de lamina corrugada de 7.3 m de diámetro. Hay una bolsa hermética a la luz (bladder) dentro de cada tanque. Cada bladder es llenado con 188 000 mil litros de agua ultra-purificada a un nivel de 4.5 m (figura 2.6). Las paredes internas de cada bladder son de color negro para reducir reflexiones de luz.



Figura 2.6: Contenedor de agua purificada hermético a la luz (Bladder) inflado para pruebas.

Anclados en el fondo de cada tanque, hay 4 PMTs mirando hacia arriba para observar la luz Cherenkov producida cuando partículas cargadas del EAS entran al tanque (fig. 2.7).

Tres de los cuatro PMTs son Hamamatsu R5912 hemisféricos de 8 pulgadas (previamente usados en el experimento Milagro) ubicados a 1.8 metros del centro del tanque, formando un triángulo. El cuarto PMT, posicionado en el centro, es un PMT de 10 pulgadas de diámetro con alta eficiencia cuántica; diseñado para incrementar la eficiencia del observatorio a cascadas de baja energía. Todos los PMTs tienen un reflector de GORE-Tex<sup>1</sup> para aumentar la recolección de luz y discriminar mejor la naturaleza de la partícula primaria. La figura 2.8 muestra gráficamente la estructura de uno de los detectores Cherenkov de agua (Water Cherenkov Detector, WCD). Cuando la construcción este completa, el observatorio comprenderá un arreglo de 300 WCDs con 1200 PMTs en total.

---

<sup>1</sup>GORE-Tex<sup>TM</sup> es un tejido impermeable.

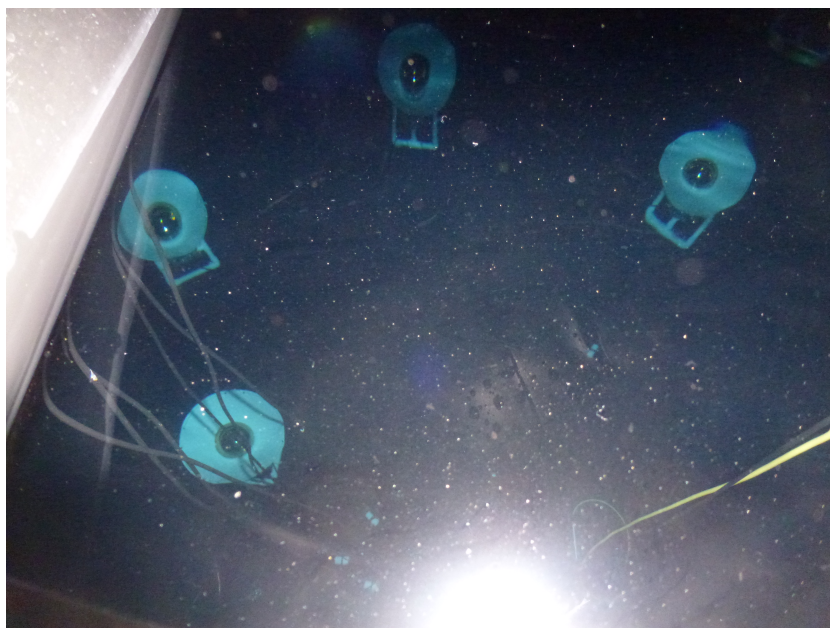


Figura 2.7: PMTs anclados al fondo de un WCD.

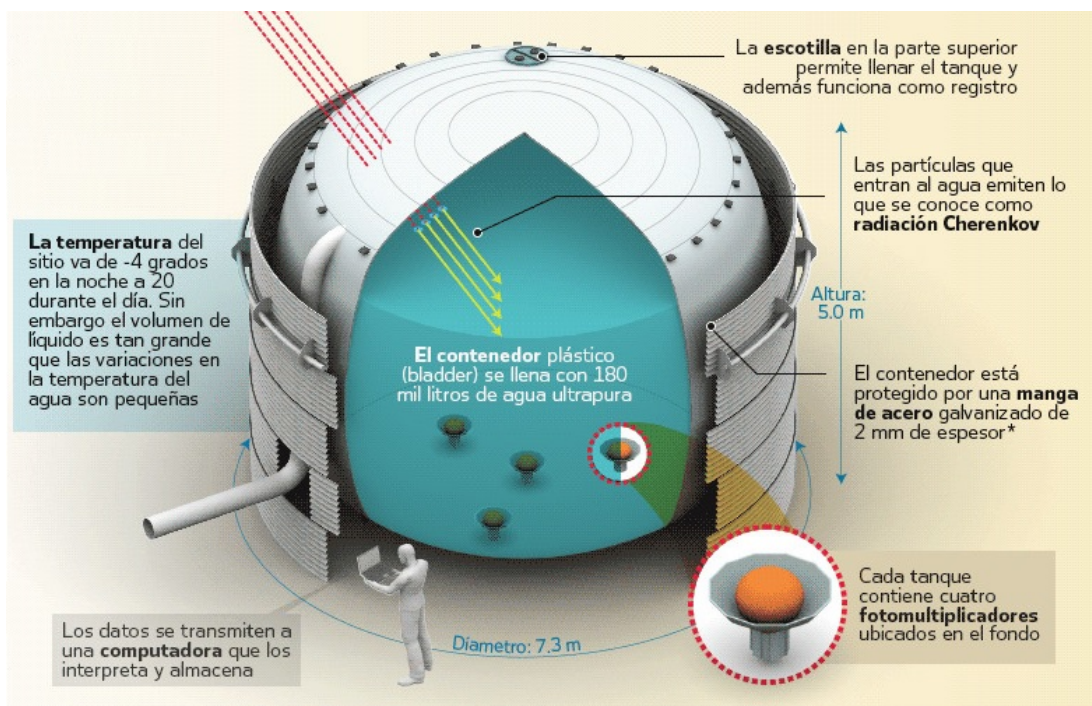


Figura 2.8: Detector Cherenkov de agua de HAWC. La silueta humana provee la escala de un tanque.

## 2.4. Adquisición de Datos

El principio de detección de HAWC descansa en la medición de la huella dejada por las partículas de un chubasco atmosférico inducido por un rayo gamma que incide en la atmósfera de la Tierra. Cuando estas partículas relativistas cargadas pasan a través del agua, producen luz Cherenkov que es captada por los PMTs. Fotones energéticos que viajan a través del agua en los tanques deben típicamente dispersarse por efecto Compton o producir un par electrón-positrón, resultando en luz Cherenkov. Este último hecho, es una gran ventaja del método Cherenkov de agua, ya que una gran fracción de la componente electromagnética de la cascada atmosférica a nivel del suelo son fotones [52].

La señal de cada PMT es transferida vía cables coaxiales (ver fig. 2.9) al cuarto de control (*counting house*) en el centro del arreglo donde los pulsos de voltaje son amplificados y una interfaz electrónica los traduce en un registro digital con precisión de nanosegundos por cada marca de tiempo. Los datos son colectados por dos sistemas de adquisición (DAQs).

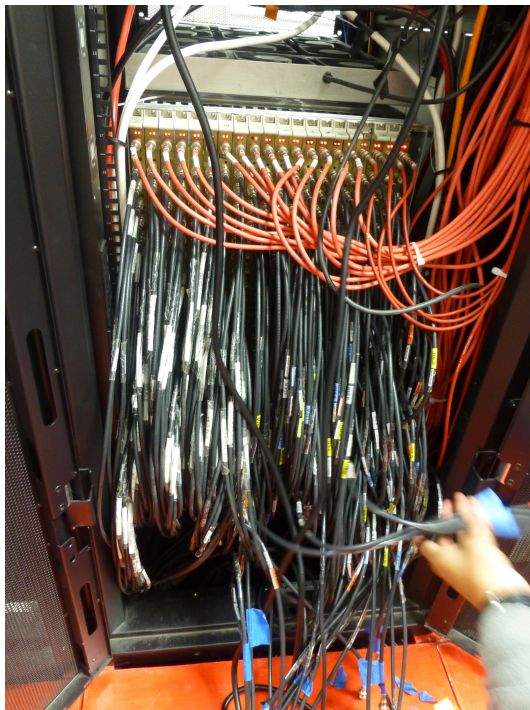


Figura 2.9: Interfaz de alto voltaje de los PMTs, (Front End Board, FEB)

El sistema principal de adquisición (main-DAQ) mide el tiempo de arribo y el tiempo por encima del umbral (time-over-threshold, ToT) del pulso de los PMTs, por lo tanto, provee información para

la reconstrucción del núcleo del chubasco (core), dirección y distribución lateral, que a su vez ayuda a determinar las especies de partículas y su energía. Un segundo DAQ; el *sistema scaler*, opera en el modo de conteo de pulsos en un PMT [60] y es sensible tanto a rayos gamma como a rayos cósmicos de eventos transitorios que producen un repentino incremento o decremento en la tasa de conteo con respecto a aquellos producidos por chubascos atmosféricos o ruido. Un disparador, completamente configurable vía software en las computadoras locales, reduce la tasa de adquisición de  $\sim 500$  MB por segundo de datos crudos a varias decenas de MB, entonces provee un flujo de datos para reconstruir chubascos atmosféricos.

## 2.5. Reconstrucción de Rayos Gamma

La dirección de un rayo gamma original puede ser definida por su ángulo cenital y acimutal con respecto al detector, éstos ángulos se pueden calcular midiendo la diferencia de tiempo entre la señal de PMTs vecinos. Una diferencia de tiempo promedio mayor, indica que el chubasco se produjo en un ángulo cenital grande, mientras que una diferencia de tiempo más pequeño indica que la cascada tuvo un ángulo cenital pequeño 2.10.

Dado que los detectores están dispuestos horizontalmente, esto significa que el frente de un chubasco inclinado alcanza a cada WCD en un tiempo diferente, con una diferencia de tiempo entre las señales del orden de  $10\text{ ns}$ .

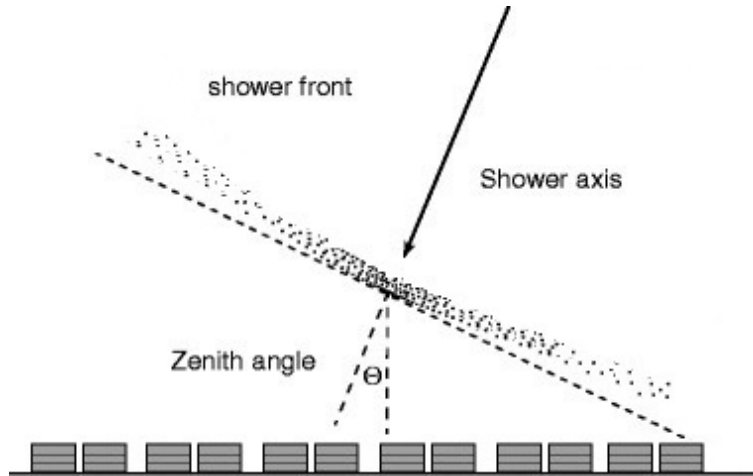


Figura 2.10: Principio de detección y geometría de reconstrucción de cascadas atmosféricas en detectores de superficie.

Cuando un chubasco llega verticalmente y debido a la naturaleza casi plana del frente del



chubasco, la diferencia entre las señales de cada detector es mucho menor. La figura 2.11 muestra la simulación de un frente de chubasco atmosférico detectado con el arreglo HAWC. El color de diferentes tanques indica los tiempos en los que el chubasco golpea cada PMT. La dirección del chubasco corresponde a la conexión entre los primeros y últimos PMTs golpeados. Un ajuste iterativo de los tiempos de arribo de las señales y sus intensidades, son utilizados para reconstruir el ángulo de un evento. La energía de un rayo gamma es proporcional al voltaje total de los PMTs disparados.

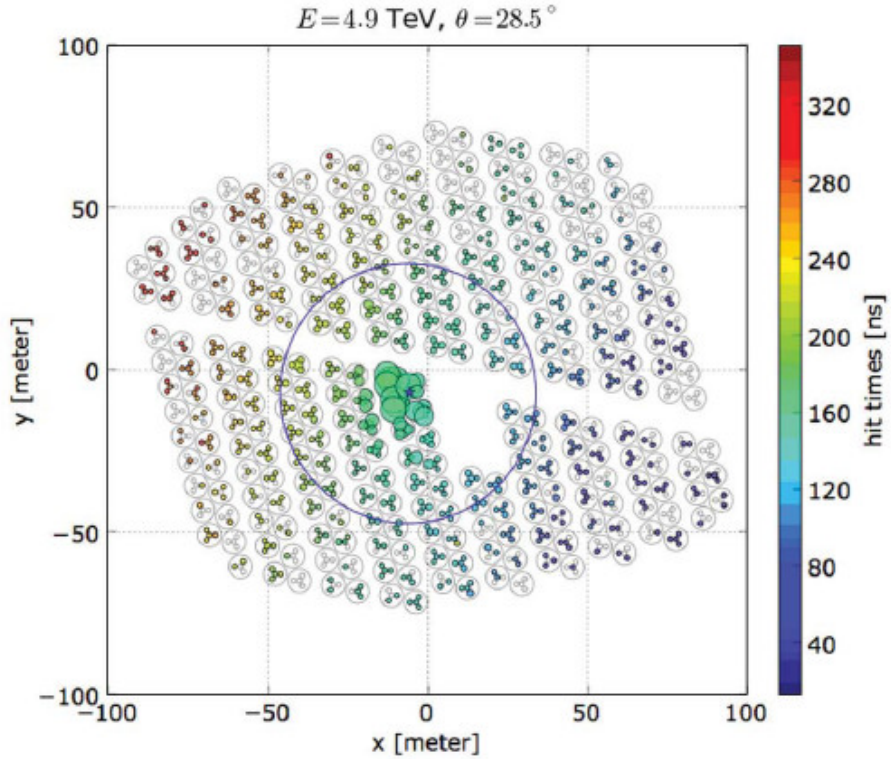


Figura 2.11: Simulación de una cascada atmosférica detectada por HAWC [42]. Los PMTs son coloreados de acuerdo a cuando fueron golpeados por el frente del chubasco. El chubasco corresponde a un rayo gamma primario de 4.9 TeV y golpea el detector con un ángulo cenital de 28.5 grados (ángulo con la vertical). El tamaño de los círculos es proporcional a la señal registrada por cada PMT.

## 2.6. Reconstrucciones *online*

Dentro del *counting-house*, se aloja un sistema de adquisición y procesamiento de datos de alto rendimiento, que ha sido diseñado y construido para realizar tareas de análisis en tiempo real.

El sistema de procesamiento, llamado sistema *online*, es responsable de reducir la entrada de 500 MB/s de datos crudos a 20 MB/s de datos útiles.

HAWC emplea un complejo y cambiante software modular llamado *AERIE* (Analysis and Event Reconstruction Integrated Environment)<sup>2</sup> para todas las tareas de procesamiento, reconstrucción y análisis. Los algoritmos de calibración y reconstrucción trabajan evento-por-evento, así, un evento alimenta de manera serial un modulo especial de calibración y reconstrucción de *AERIE*. La calibración permite corregir desfasamientos en el tiempo entre los PMTs y convierte las señales digitales en intensidades de carga observadas por cada PMT. Los tiempos y cargas, son empleados por el modulo de reconstrucción del core y dirección del chubasco. Éstos datos también son empleados para caracterizar la cascada atmosférica como hadrónica o de rayo gamma.

El reconstructor de tiempo real comprende uno de los principales eslabones en la cadena de adquisición de datos y es frecuentemente la única oportunidad para la búsqueda de eventos transitorios.

Los datos reconstruidos de HAWC son organizados por corridas; un número de seis dígitos (p.e. 001229). Una corrida (*run*) es definida como una sesión de inicio y parada del sistema DAQ. Se busca que el sistema DAQ mantenga una corrida continua de 24 horas. Actualizaciones en el sistema DAQ y sesiones de calibración de HAWC intervienen a menudo con este propósito. No todas las corridas producen eventos reconstruibles debido a las pruebas sistemáticas que el sistema DAQ realiza, así es que, no debe sorprender que cierto numero de corridas son perdidas de la lista de corridas reconstruidas. Dentro de las corridas hay subcorridas. Una subcorrida consiste de 2 minutos de datos escritos en archivos de aproximadamente 100 MB. El formato de datos exclusivo de HAWC emplea la librería llamada XCDF (eXplicitly Compacted Data Format). Un archivo XCDF contiene una cabecera con información básica y una secuencia de bloques de datos.

---

<sup>2</sup>*AERIE* proporciona una serie de herramientas destinadas al procesamiento de las observaciones y subsecuente análisis. El software es estructurado como un conjunto de proyectos C++ & Python interdependientes operados por un *core* central.

## Capítulo 3

# Datos y análisis de las observaciones

### 3.1. La muestra de datos

El análisis realizado en este trabajo emplea datos reconstruidos *online* recabados por HAWC-111 en el periodo comprendido entre 1 de enero (MJD<sup>1</sup> 56664) y 31 de julio de 2014 (MJD 56839). Un total de 180 días contenidos en 35 TB. Por homogeneidad en los datos, se ha descartado el conjunto de datos de HAWC-111 correspondiente al periodo agosto-diciembre 2013 debido a la truncaada continuidad en la adquisición de datos, atribuido a las frecuentes interrupciones por calibración y mantenimiento de hardware y software. Algunas de las corridas en la muestra de datos fueron excluidas debido a que contienen datos corruptos; estas corridas representan una pequeña fracción del conjunto entero de datos.

| Inicio       |           |           | final       |           |           | Días |
|--------------|-----------|-----------|-------------|-----------|-----------|------|
| 1-Enero-2014 | 02:13 UTC | MJD 56658 | 30-Junio-14 | 23:33 UTC | MJD 56838 | 180  |
| run 1084     |           |           | run 1553    |           |           |      |

Tabla 3.1: Muestra de datos de HAWC-111

---

<sup>1</sup>El día Juliano modificado (Modified Julian Day, MJD), es una versión abreviada del método de fechación del día Juliano (JD), que cuenta el número de días transcurridos desde el mediodía del 1 de enero de 4713 A.C. Un día Juliano es  $\sim 240$  segundos más corto que un día civil. El MJD se define como:  $MJD = JD - 2400000.5$  días.

## 3.2. Programas de Análisis de datos: *Map-Maker*

El software para producir mapas del cielo para HAWC es llamado *Map-Maker* y se encuentra dentro de AERIE. El propósito del código es crear mapas del cielo observado por el experimento a partir de datos de chubascos reconstruidos [28]. Éste emplea el software HEALPix [37] para mapear regiones de igual área del cielo en lugar de usar intervalos dependientes de la declinación (véase la Figura 3.1)

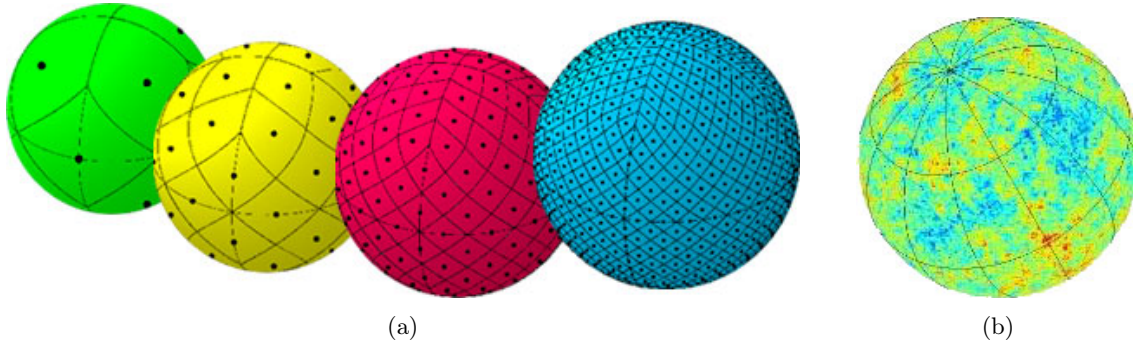


Figura 3.1: **a)** HEALPix (Hierarchical Equal Area isoLatitude Pixelization of a sphere) produce la subdivisión de una superficie esférica en la cual cada uno de los píxeles cubre la misma área. La figura muestra el particionamiento de una esfera a resoluciones cada vez más elevadas. La esfera verde representa la resolución más baja con HEALPix; 12 píxeles de igual área. La esfera azul tiene una cuadrícula de 768 píxeles ( $\sim 7.3$  grados de resolución). **b)** Las áreas en un esfera llegan a ser muy complejas si ellas son limitadas por líneas de ascension recta y declinación.

## 3.3. Análisis de las observaciones

El proyecto *Map-Maker* es empleado para producir un mapa de datos y un mapa de background estimado a partir de la dirección y los tiempos de arribo de partículas cósmicas. Los mapas son histogramas bidimensionales de las direcciones de arribo de chubascos atmosféricos. Una minoría de eventos son señales reales, así el background puede ser estimado de los datos en sí mismo. La técnica de estimación del background usada es por integración directa, la cual convolucionada la distribución de eventos en coordenadas locales y la distribución de eventos en el tiempo, en intervalos de 2 horas. Las coordenadas locales de arribo, son convertidas al sistema de coordenadas ecuatoriales celestes para el mapeo, que permite estudiar diferentes fenómenos y objetos celestes.

Después de la creación de mapas de datos y de background, un proceso llamado “suavizado de mapas” puede ser usado para explorar diferentes escalas angulares (p. ej. fuentes difusas y fuentes puntuales). En este trabajo se ha empleado un suavizado doble Gaussiano que es la combinación



### CAPÍTULO 3. DATOS Y ANÁLISIS DE LAS OBSERVACIONES

#### 3.3. ANÁLISIS DE LAS OBSERVACIONES

---

lineal de dos funciones Gaussianas, es decir,  $D = A * G_1(\sigma_1) + (1 - A) * G_2(\sigma_2)$ . Esta función es usada porque la función de dispersión de los eventos en el detector en las simulaciones Monte Carlo no es una función Gaussiana perfecta.

El algoritmo de suavizado llena un mapa de background con datos de eventos “pesados”. Los “pesos” son asignados a cada mapa basados en la eficiencia de la separación Gamma-Hadrón del detector; los pesos usados en este análisis fueron calculados en la simulación Monte Carlo de HAWC-111, para el tránsito a 15° del cenit de una fuente similar al Cangrejo.

La tabla 3.2 muestra los cortes para análisis y los pesos para HAWC-111 para cada intervalo de energía llamados *bines* [66], [21].

| Bin | nCh <sub>min</sub> | nCh <sub>max</sub> | OptCut | $\sigma_1$ | $\sigma_2$ | A    | GHW  |
|-----|--------------------|--------------------|--------|------------|------------|------|------|
| 0   | 24                 | 37                 | 1.9    | 1.22       | 1.99       | 1.00 | 1.0  |
| 1   | 38                 | 58                 | 3.1    | 0.65       | 1.07       | 0.14 | 1.4  |
| 2   | 59                 | 91                 | 5.2    | 0.73       | 2.00       | 0.79 | 2.3  |
| 3   | 92                 | 138                | 6.6    | 0.54       | 0.95       | 0.69 | 3.5  |
| 4   | 139                | 198                | 9.3    | 0.44       | 0.88       | 0.76 | 5.8  |
| 5   | 199                | 266                | 12.1   | 0.40       | 0.83       | 0.82 | 9.3  |
| 6   | 267                | 329                | 13.7   | 0.35       | 0.74       | 0.81 | 13.6 |
| 7   | 330                | 378                | 17.1   | 0.33       | 0.74       | 0.83 | 22.4 |
| 8   | 379                | 412                | 10.6   | 0.31       | 0.70       | 0.80 | 44.8 |
| 9   | 413                | 444                | 7.2    | 0.30       | 0.72       | 0.77 | 42.0 |

Tabla 3.2: Bines para HAWC-111

Donde:

**Bin:** Índice usado por bin.

**nCh<sub>min</sub>:** Mínimo número de canales (PMTs) que ven el chubasco.

**nCh<sub>max</sub>:** Máximo número de canales (PMTs) que ven el chubasco.

**OptCut:** Óptimo parámetro de compacidad nCh/CxPE<sub>40</sub> que maximiza la razón señal-a-ruido para el bin.

$\sigma_1$  Ancho de la primer Gaussiana

$\sigma_2$  Ancho de la segunda Gaussiana

**GHW** Peso de este bin relativo al bin con mínima razón señal-a-ruido.

### 3.3.1. Significancia de una medición

La significancia estadística del exceso (o déficit) relativo entre el conteo de eventos y el background se calcula usando la significancia de Li & Ma [45]. El método de la significancia de Li & Ma es perfecto para detectores de chubascos atmosféricos producidos por rayos gamma de alta energía. Los mapas del cielo observado por HAWC contienen un gran número de eventos, sin embargo, un número relativamente pequeño de eventos apuntan a una fuente. La mayoría de los eventos son debidos a partículas primarias cargadas no correlacionadas (Poissoniano). En estas condiciones; gran número de eventos, señal baja y background grande, el método de Li & Ma devuelve la probabilidad de que una región del cielo contenga una fuente.

La significancia  $S$  de una medición es dada por:

$$S = \sqrt{2} \sqrt{N_{on} \ln \left( \frac{1 + \alpha}{\alpha} \frac{N_{on}}{(N_{on} + N_{off})} \right) + N_{off} \ln \left( (1 + \alpha) \frac{N_{off}}{(N_{on} + N_{off})} \right)} \quad (3.1)$$

donde  $N_{on}$  es el número de eventos registrados mientras se observa la fuente,  $N_{off}$  es el número de eventos en el background, y  $\alpha$  es la exposición relativa de la señal al background y es dada por

$$\alpha(\delta) = \left( \frac{B}{\cos \delta} \right) \left( \frac{1}{T \times 15} \right) \quad (3.2)$$

donde  $B$  es el tamaño de la región del cielo,  $0.1^\circ$  en este caso,  $\delta$  es la declinación de la región en la cual la significancia es calculada, y  $T$  es el tiempo de integración en horas; 2 horas en este caso. El primer termino de la derecha da la exposición de la señal en grados, mientras que el segundo da el recíproco de la exposición del background en grados. El numero 15 en el denominador es el número de grados que la Tierra rota en un hora [2].

## 3.4. Procedimiento de *Map-Making*

Los mapas del cielo observado por HAWC son generados en un proceso de múltiples pasos.

El primer paso para producir un mapa del cielo por cada bin para cada corrida es ejecutar el modulo *aerie-apps-make-hawc-map*, que lee archivos con chubascos atmosféricos reconstruidos

reco-online, uno a la vez con el fin de ensamblar un archivo en formato FITS<sup>2</sup> que contiene mapas HEALPix necesarios para el cálculo de la significancia estadística sobre todo el cielo. En esta etapa se seleccionan los eventos observados de acuerdo a los cortes gamma-hadrón encontrados en las simulaciones Monte Carlo (3.2), se establece el sistema de coordenadas ecuatorial celeste (J2000) y la resolución angular de los mapas HEALPix ( $N_{Side512} = 0.1^\circ$  por pixel). Procesar 24 horas de datos toma alrededor de 10 horas de computo, en este paso, la paralelización fue crucial<sup>3</sup>, ya que se procesaron  $\sim 35$  TB de información, equivalentes a 180 días de datos ( $\sim 4320$  horas).

El siguiente paso es combinar los mapas HEALPix de todas las corridas en un sólo mapa por cada bin. Esta etapa es la más sencilla del proceso y permite realizar agrupaciones de observaciones en diferentes escalas de tiempo; horas, días, meses, etc. Finalmente se obtiene un mapa HEALPix de la significancia estadística a partir de un mapa suavizado (sec. 3.3).

Para la visualización y análisis de los mapas existe un conjunto de scripts python llamados Healpy que permiten manipular mapas en formato FITS para obtener imágenes del cielo con diferentes proyecciones: Mollweide y Mercator<sup>4</sup>. AERIE viene con una conjunto de scripts healpy para análisis de mapas. Alternativamente a este método se ha empleado el software IRAF (Image Reduction and Analysis Facility)[41], que permite un análisis dinámico de imágenes astronómicas.

### 3.5. Alineación cenital

Se define la alineación cenital como el ajuste aplicado a todo el conjunto de datos; una ligera rotación en todos los ángulos, de manera que el máximo flujo de rayos cósmicos es alineado exactamente con el cenit. La hipótesis es que después de completar la alineación cenital, todos los datos deben apuntar en la misma dirección. Finalmente, se emplea la posición del Cangrejo para verificar el apuntado.

Para HAWC-111, la alineación cenital no fue aplicada durante el proceso de reconstrucción, por lo que es necesario realizar esta tarea durante el proceso de *map-maker*. Para este análisis se

---

<sup>2</sup>Flexible Image Transport System (FITS) es un formato de archivos útil para almacenar, transmitir y procesar imágenes científicas. FITS es el formato de archivo comúnmente usado en astrofísica.

<sup>3</sup>Para el almacenamiento y procesamiento de los datos, se empleó el Clúster FÉNIX y dos computadoras con información de respaldo. FÉNIX es un arreglo de computadoras destinadas a apoyar el trabajo de investigación de los grupos de altas energías de la FCFM-BUAP.

<sup>4</sup>La proyección Mollweide es una proyección pseudo-cilíndrica de la esfera delimitada por una elipse, donde la línea del Ecuador es el doble de longitud que la línea del meridiano central. Todos los meridianos al lado del central son elípticos y los paralelos están desigualmente espaciados a fin de preservar áreas. La proyección Mercator es una proyección cilíndrica de la esfera, donde los meridianos y paralelos son rectas perpendiculares entre si. Los meridianos son igualmente espaciados y los paralelos son espaciados a fin de preservar ángulos centrales.

empleo la version más actualizada del modulo *offline-zenith-alignment-generator*.

Con las correcciones en alineación cenital, se mejora de manera significativa el apuntado y la resolución angular de las observaciones. Las siguientes figuras muestran una comparación entre los resultados obtenidos antes y después de la alineación cenital. En las figuras se muestran las observaciones de la galaxia Markarian 421 (Mrk 421) durante la primera semana de marzo de 2014. La cruz central, indica la posición de la galaxia reportada en la literatura, el punto difuso cerca del centro señala las emisiones de Mrk 421 obtenidas con HAWC-111. La figura 3.2a despliega las observaciones sin la alineación cenital. La figura 3.2b muestra el resultado de aplicar las actualizaciones contenidas en la versión 1.26.02. La mejora obtenida tras la aplicación de la alineación cenital es una disminución en el error de apuntado y un aumento en la significancia estadística en la posición de emisión de la fuente reportada por TeV-Cat [54].

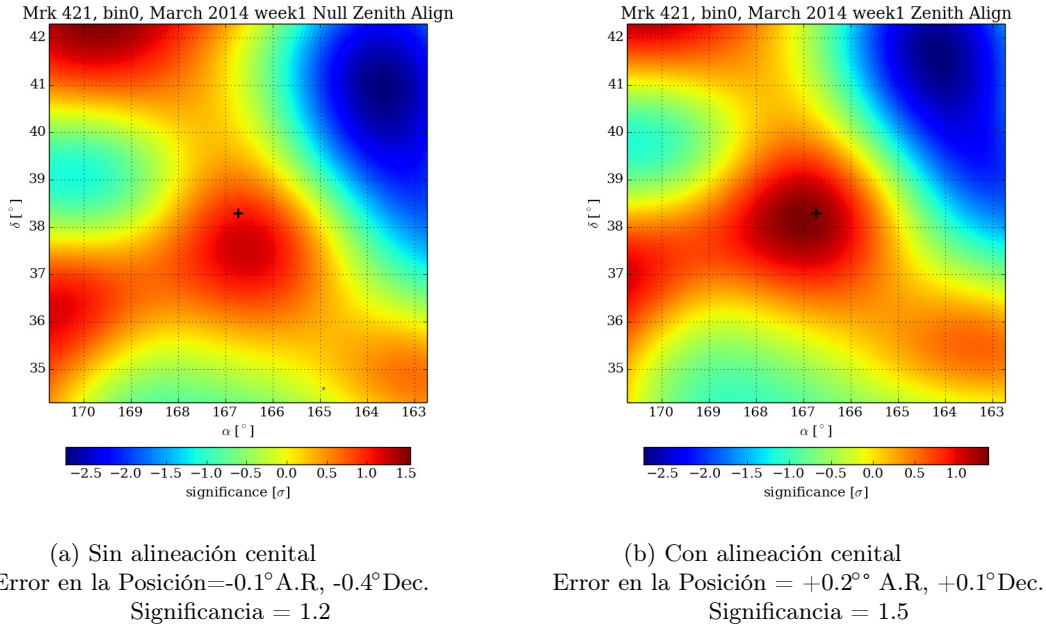


Figura 3.2: Comparación de mapas de significancia de Markarian 421, con y sin corrección por alineación cenital. El código de color representa la significancia estadística del exceso de rayos gamma en cada punto.

## Capítulo 4

# Resultados

La técnica de análisis mencionada en 3.3 fue aplicada a los seis meses de datos 3.1. La figura 4.1 despliega una mapa preliminar en coordenadas ecuatoriales celestes de la significancia estadística del cielo observado por HAWC-111 a lo largo del primer semestre de 2014. Éste mapa fue obtenido empleando el bin 3 definido en 3.2 En la figura 4.2 se muestra un mapa de cielo en coordenadas galácticas con los seis meses de observaciones, en este se encuentra que en el Centro Galáctico aún no se detectan fuentes con una emisión significativa. Las coordenadas celestes, Ascensión Recta (A.R. o  $\alpha$ ) y la Declinación (Dec. o  $\delta$ ), son empleadas en este análisis. Las coordenadas galácticas, Longitud ( $l$ ) y Latitud galáctica ( $b$ ) no son empleadas en este trabajo porque el estudio no está necesariamente centrado en el estudio del plano galáctico de nuestra galaxia.

### 4.1. Observaciones de la Nebulosa del Cangrejo

En esta sección se presentan imágenes de mapas preliminares de la Nebulosa del Cangrejo, con los datos recabados a lo largo de 6 meses de observación. Las figuras 4.3, 4.4, 4.5, 4.6 y 4.7 muestran un mosaico de mapas de la región del Cangrejo obtenida con los 10 diferentes bins definidos en la tabla 3.2. La proyección del cielo empleada en estos mapas es la proyección Mercator. En el análisis efectuado sobre la región de emisión del Cangrejo, se ha encontrado que el Bin 3 muestra una mayor significancia en la vecindad de la posición de la fuente. En los bins 0-2 y en bins más altos la significancia en la región del Cangrejo es dominada por fluctuaciones estadísticas, por consiguiente, emplearemos este Bin para explorar la variabilidad temporal de emisión.

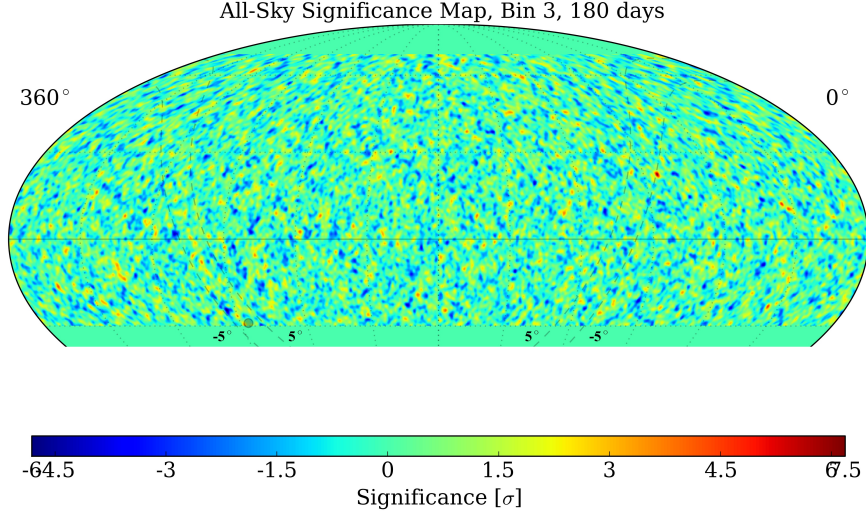


Figura 4.1: Mapa en coordenadas ecuatoriales de la significancia estadística del cielo observado por HAWC-111 a lo largo del primer semestre de 2014 (180 días). El código de color en la figura representa la significancia estadística en sigmas. La proyección del cielo empleada en este mapa es la proyección Mollweide. Las líneas punteadas delimitan una región de  $\pm 5$  grados alrededor del plano galáctico. El círculo representa la posición del centro galáctico.

Para la estudiar de la variabilidad de las fuentes seleccionadas, se eligieron intervalos de integración de una semana y un mes. Se empleo el día sideral ( $\sim 23\text{h } 56\text{m}$ ) como unidad básica de tiempo. Subsecuentemente se combinan los datos en intervalos de 7 días siderales (semana sideral) y 30 días siderales (mes sideral) para producir mapas siderales del cielo.

Los ejes  $X$ - $Y$ , representan las coordenadas ecuatoriales celestes; el eje  $X$  representa la Ascensión Recta; el eje  $Y$  representa la coordenada de Declinación. La cruz central en las imágenes indica la posición de la nebulosa reportada en TeV-Cat[54]. Las etiquetas en la región del Cangrejo indica las posiciones de otras fuentes documentadas en TeV-Cat. El código de color en las figuras representa la significancia estadística del exceso de señal en cada punto.

Conforme HAWC colecta más datos, es posible incrementar la sensibilidad por integración. Con la muestra de 180 días de datos de HAWC-111, en este análisis se ha alcanzado un exceso de  $6.2 \pm 0.93$  sigmas en la Nebulosa del Cangrejo empleando únicamente el bin 3; sobrepasando la sensibilidad de 3 años de observación de Milagro, con un conjunto de datos menores a un año y con sólo una porción del detector (0.37 %) y empleando un sólo bin de energía. En la figura 4.1 muestra que la fuente TeV de rayos-gamma con la emisión más significativa observada por HAWC-111 en el bin 3 es la Nebulosa del Cangrejo.

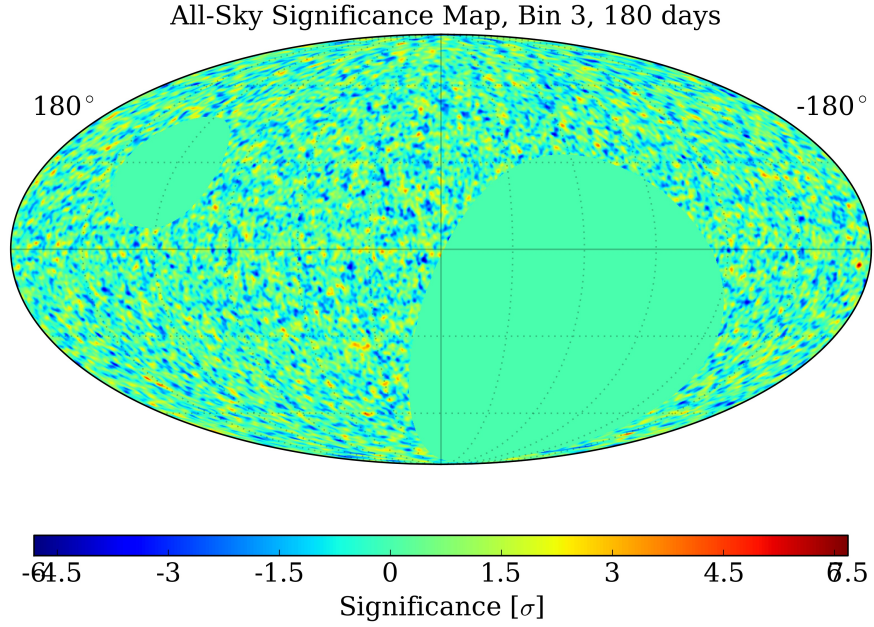


Figura 4.2: Mapa Mollweide en coordenadas galácticas de la significancia estadística del cielo observado por HAWC-111 a lo largo del primer semestre de 2014 (180 días). El código de color en la figura representa la significancia estadística en sigmas. En este sistema de coordenadas, la posición de la Nebulosa del Cangrejo es Longitud galáctica:  $-184.56$  grados, Latitud galáctica:  $-5.79$  grados. Markarian 421 tiene coordenadas, Long. Gal.:  $79.88$  grados, Lat. Gal.:  $65.01$  grados. La proyección del cielo empleada en este mapa es la proyección Mollweide.

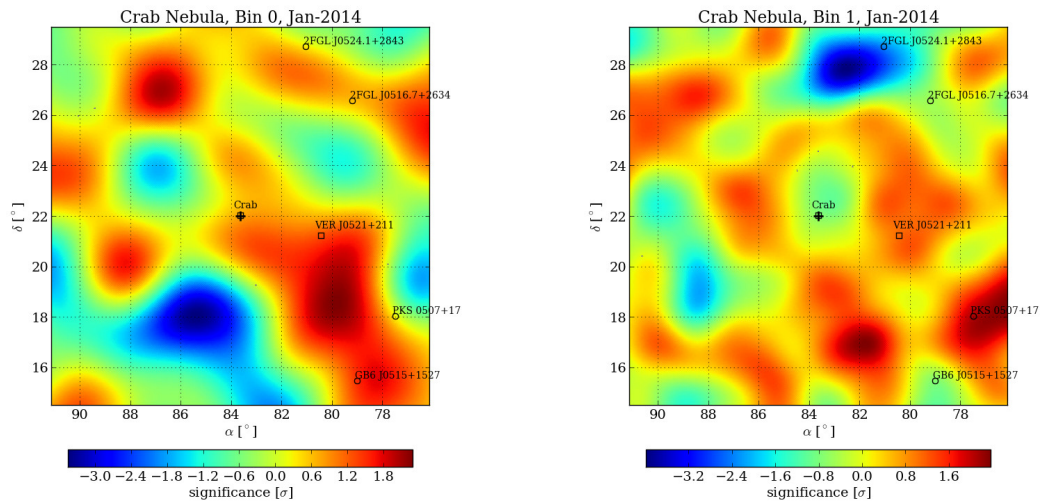


Figura 4.3: Mapas de significancia de la Nebulosa del Cangrejo. Bin 0 & Bin 1.



## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

### 4.1. OBSERVACIONES DE LA NEBULOSA DEL CANGREJO

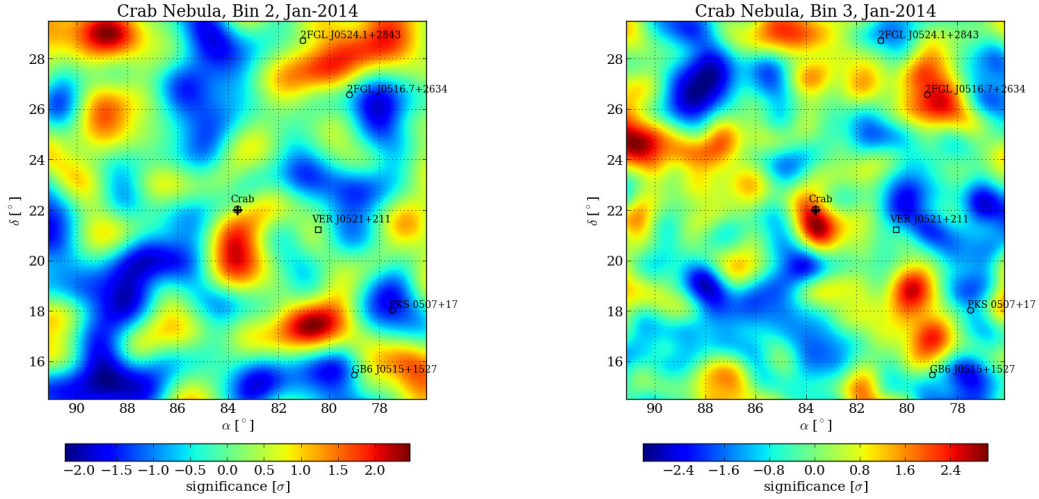


Figura 4.4: Mapas de significancia de la Nebulosa del Cangrejo. Bin 2 & Bin 3.

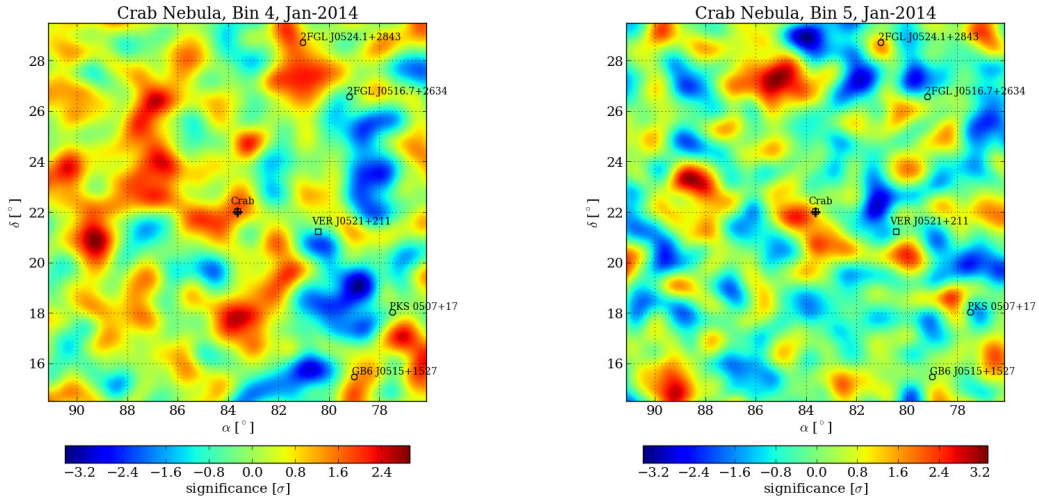


Figura 4.5: Mapas de significancia de la Nebulosa del Cangrejo. Bin 4 & Bin 5.

La figura 4.11 muestra un acercamiento de la región alrededor de la Nebulosa del Cangrejo y se observa un exceso de rayos gamma en  $84.02^\circ$  A. R.,  $22.19^\circ$  Dec. Con un error en la posición  $+0.63^\circ$  A. R.,  $+1.17^\circ$  Dec. con respecto a la posición verdadera de la Nebulosa de Cangrejo, que de acuerdo al TeV-Cat [54] se encuentra localizada en  $83.63^\circ$  A. R.,  $22.01^\circ$  Dec.

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

### 4.1. OBSERVACIONES DE LA NEBULOSA DEL CANGREJO

---

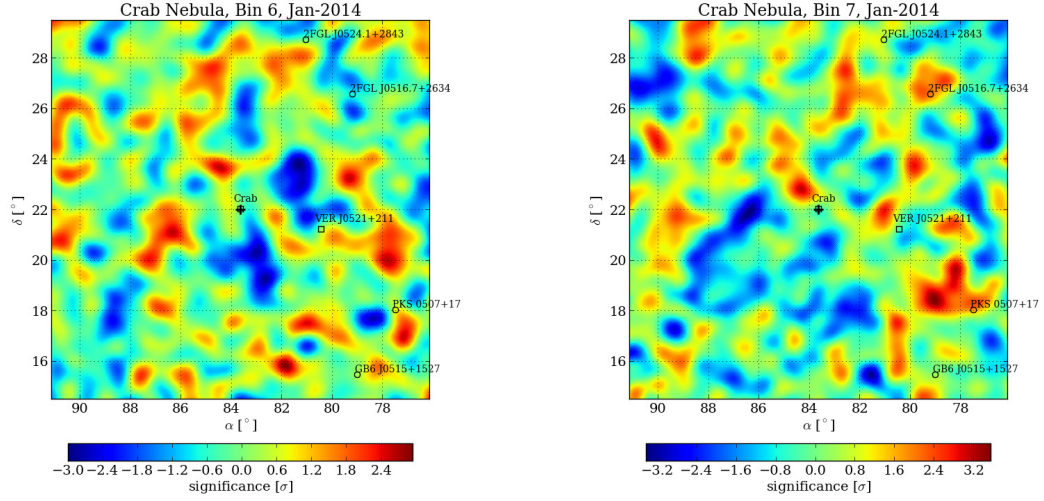


Figura 4.6: Mapas de significancia de la Nebulosa del Cangrejo. Bin 6 & Bin 7.

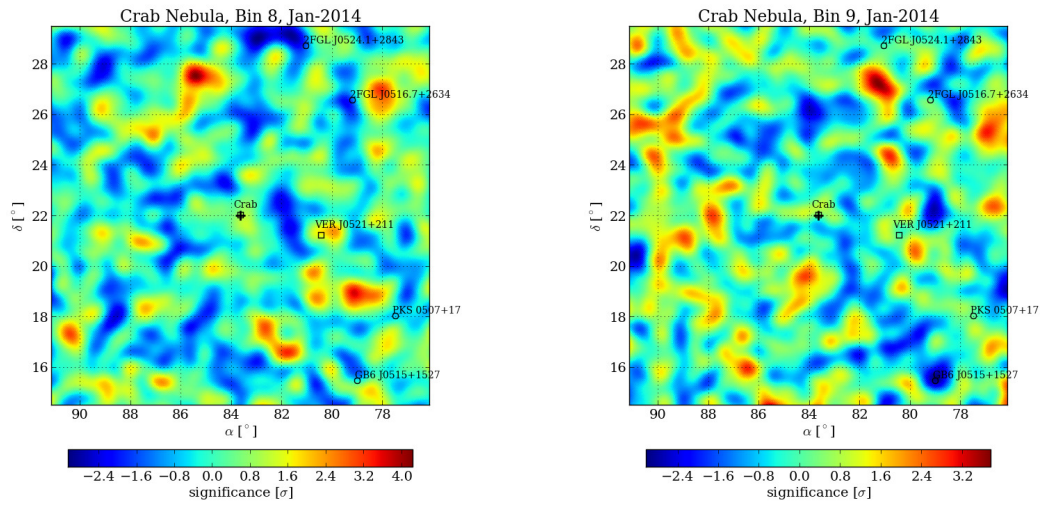


Figura 4.7: Mapas de significancia de la Nebulosa del Cangrejo. Bin 8 & Bin 9.

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

### 4.1. OBSERVACIONES DE LA NEBULOSA DEL CANGREJO

---

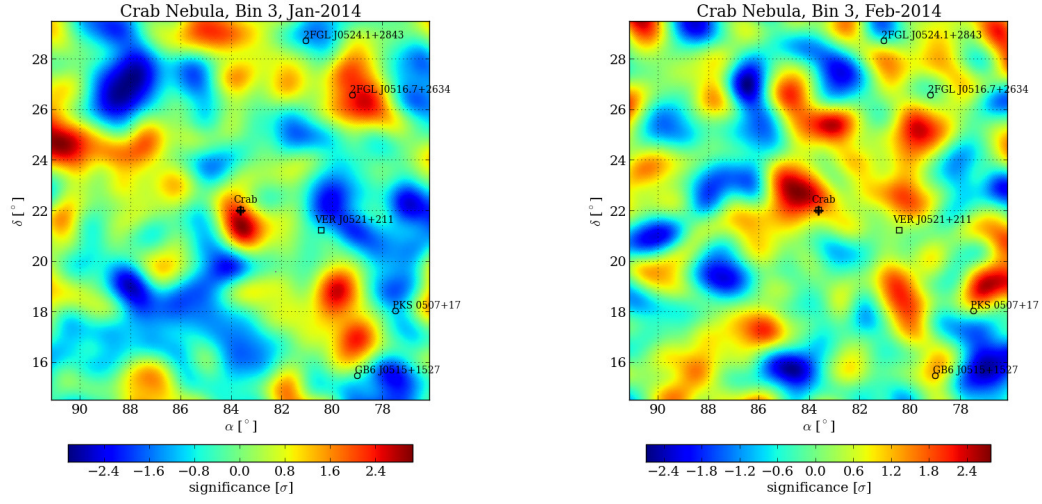


Figura 4.8: Mapas siderales en Bin 3 de la Nebulosa del Cangrejo correspondientes a enero y febrero de 2014.

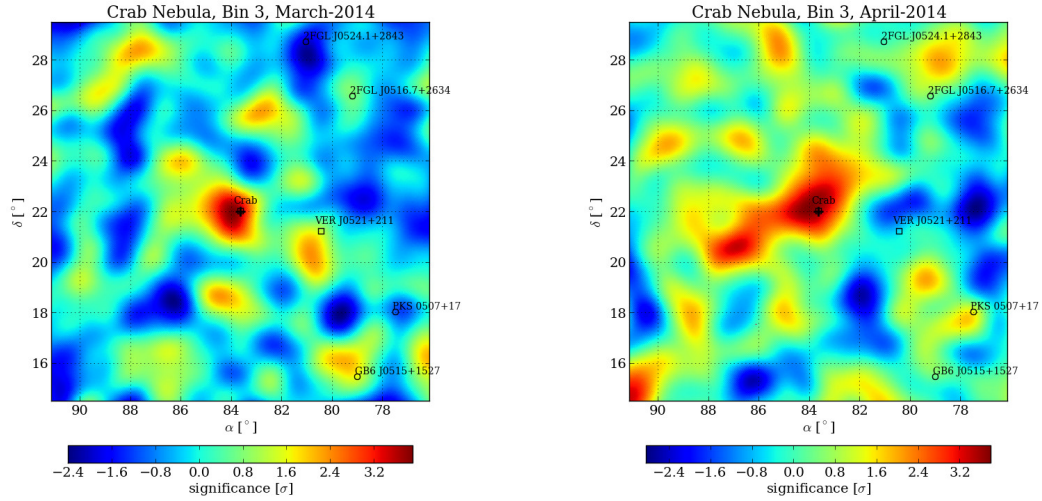


Figura 4.9: Mapas siderales en Bin 3 de la Nebulosa del Cangrejo correspondientes a marzo y abril de 2014.

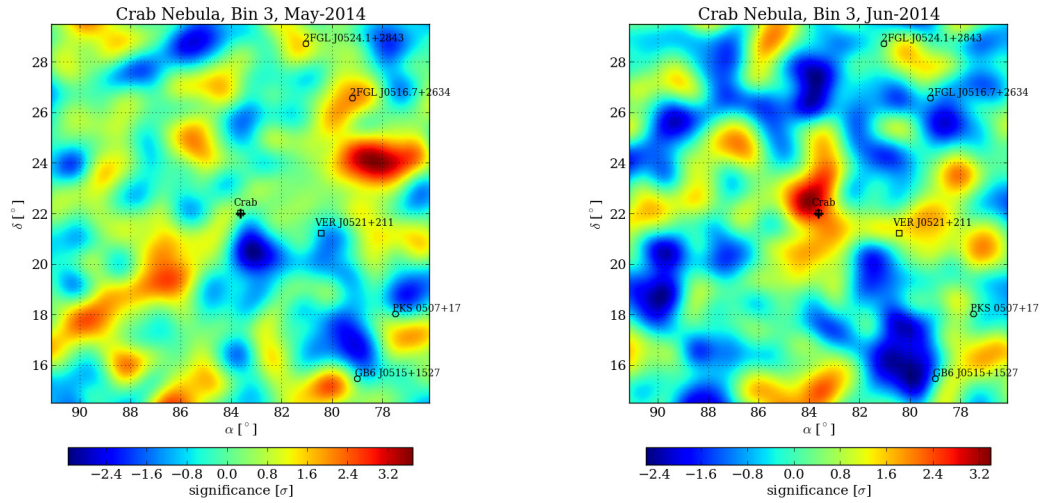


Figura 4.10: Mapas siderales en Bin 3 de la Nebulosa del Cangrejo correspondientes a mayo y junio de 2014.



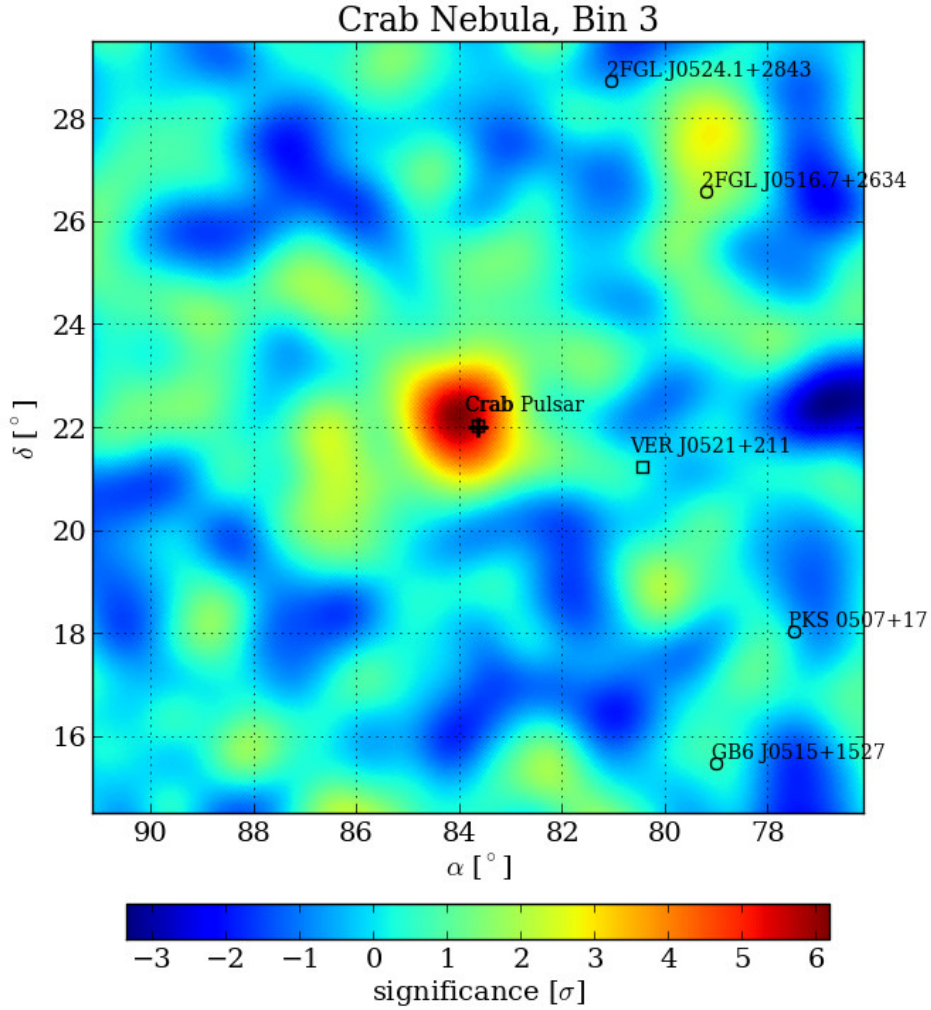


Figura 4.11: Mapa de significancia en rayos gamma centrado en la posición de la Nebulosa del Cangrejo para el conjunto de datos correspondiente al primer semestre de 2014 (180 días). El código de color representa la significancia estadística del exceso de rayos gamma en cada punto. La significancia alcanzada es de  $6.2 \pm 0.93$  sigmas.

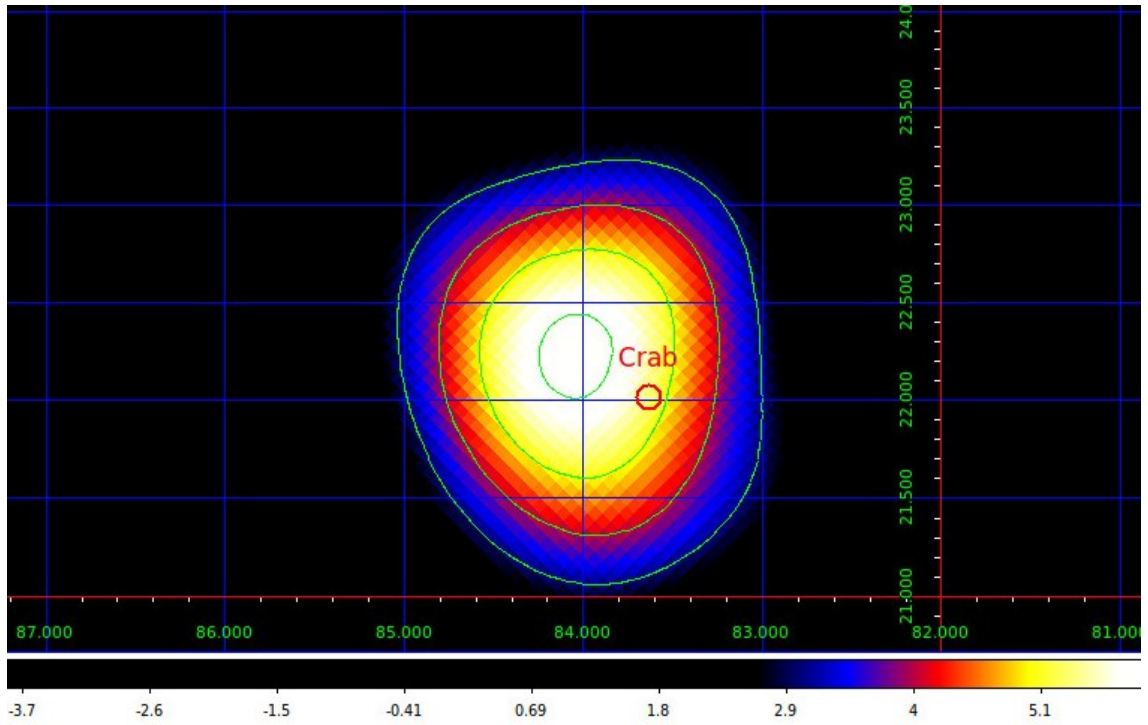


Figura 4.12: Imagen en rayos gamma de la región alrededor de la Nebulosa de Cangrejo para el conjunto de datos correspondiente al primer semestre de 2014 (180 días). El código de color representa la significancia estadística del exceso de rayos gamma en cada punto. Las líneas en la figura representan las curvas de iso-significancia correspondientes a  $\sigma = 3, 4, 5$  y  $6$  respectivamente. El círculo rojo representa la posición del cangrejo reportada en TeV-Cat (83.63 A. R., 22.01 Dec).

## 4.2. Observaciones de Markarian 421

En este análisis, la Galaxia Activa Markarian 421 también ha sido monitoreada mensualmente y se ha encontrado que al igual que la Nebulosa del Cangrejo muestra una mayor significancia en el Bin 3 y esporádicamente en el Bin 0. En bins más altos la significancia en la región alrededor de la Galaxia es dominada por fluctuaciones estadísticas. Las figuras 4.13, 4.14, 4.15, 4.16 y 4.17, despliegan los mapas en la región de Markarian 421 con los 10 diferentes bins.

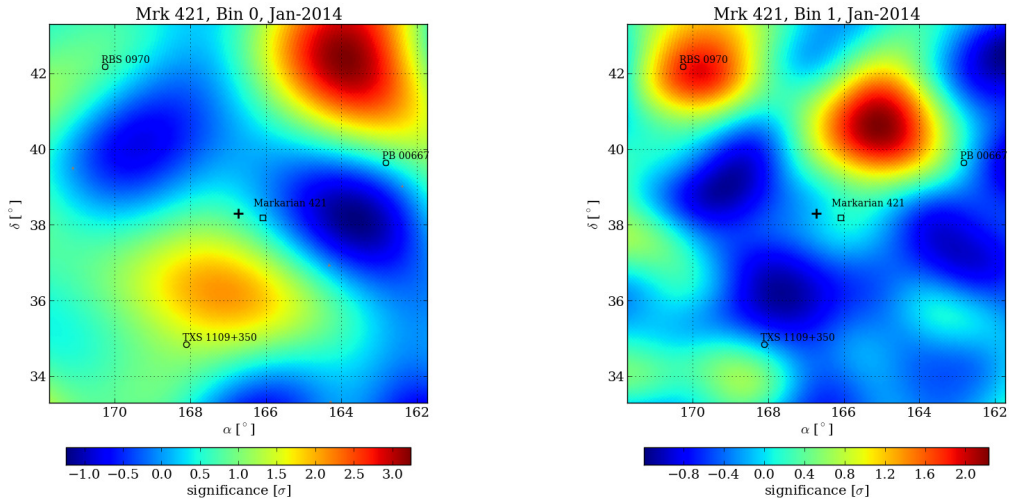


Figura 4.13: Mapas de significancia de Markarian 421. Bin 0 & Bin 1.

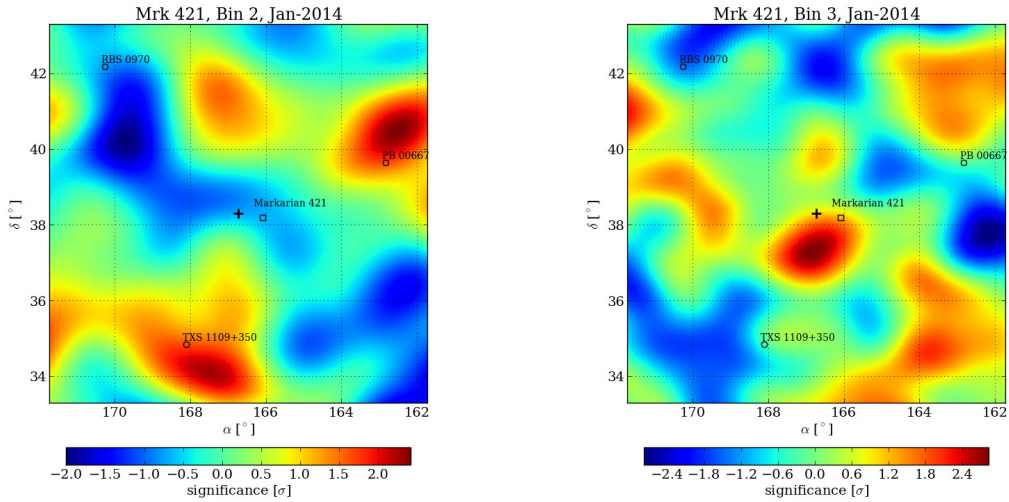


Figura 4.14: Mapas de significancia de Markarian 421. Bin 2 & Bin 3.



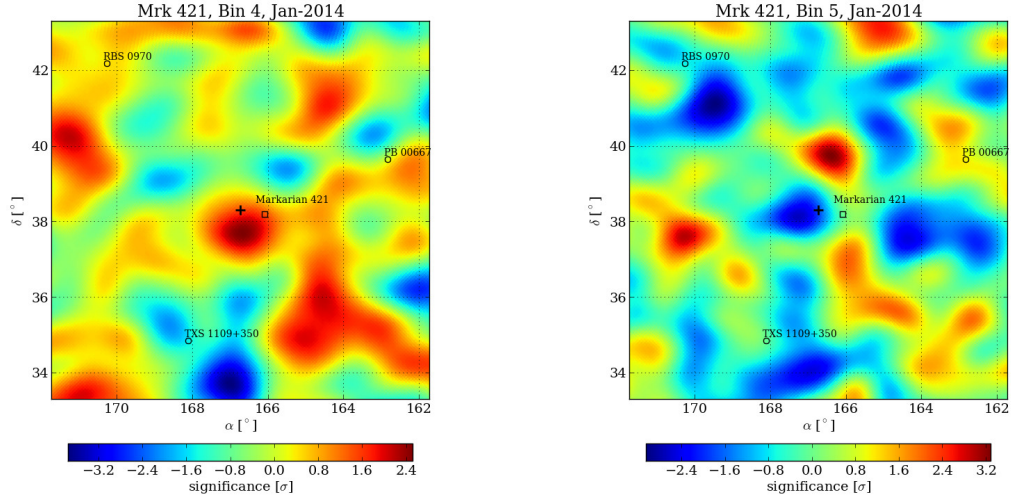


Figura 4.15: Mapas de significancia de Markarian 421. Bin 4 & Bin 5.

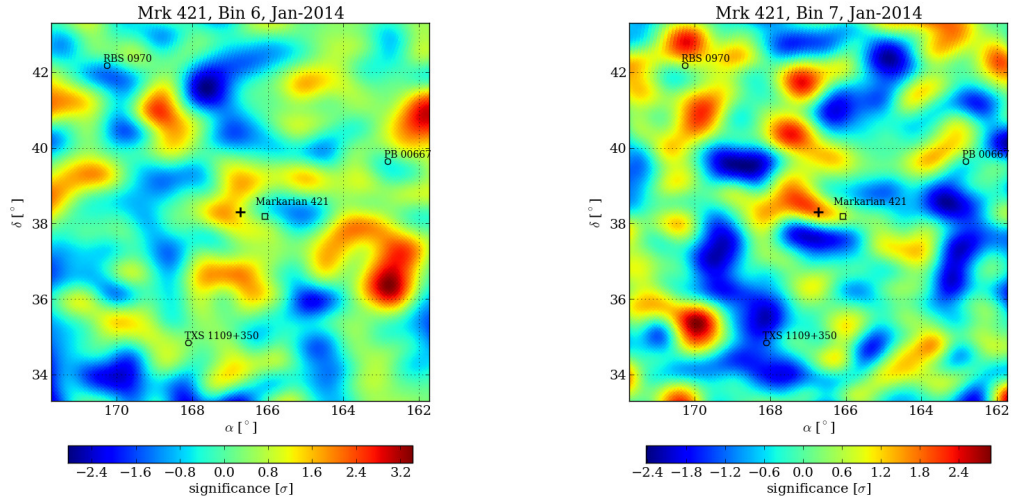


Figura 4.16: Mapas de significancia de Markarian 421. Bin 6 & Bin 7.

Las figuras 4.18, 4.19 y 4.20 despliegan el mosaico de imágenes mensuales. Los ejes  $X$ - $Y$ , representan las coordenadas ecuatoriales celestes; el eje  $X$  representa la Ascensión Recta; el eje  $Y$  representa la coordenada de Declinación. La cruz central en las imágenes indica la posición de la Galaxia reportada en TeV-Cat[54].

La figura 4.24 muestra la región alrededor de Mrk 421 y se observa la posición del exceso de rayos gamma ( $3.8 \pm 1.2$  sigmas) en  $166.31^\circ$  A. R.,  $37.56^\circ$  Dec., con un error en la posición  $-0.42^\circ$  A. R.,  $-0.74^\circ$  Dec. con respecto a su posición documentada en el TeV-Cat [54], ( $166.73^\circ$  A. R.,  $38.3$

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

### 4.2. OBSERVACIONES DE MARKARIAN 421

---

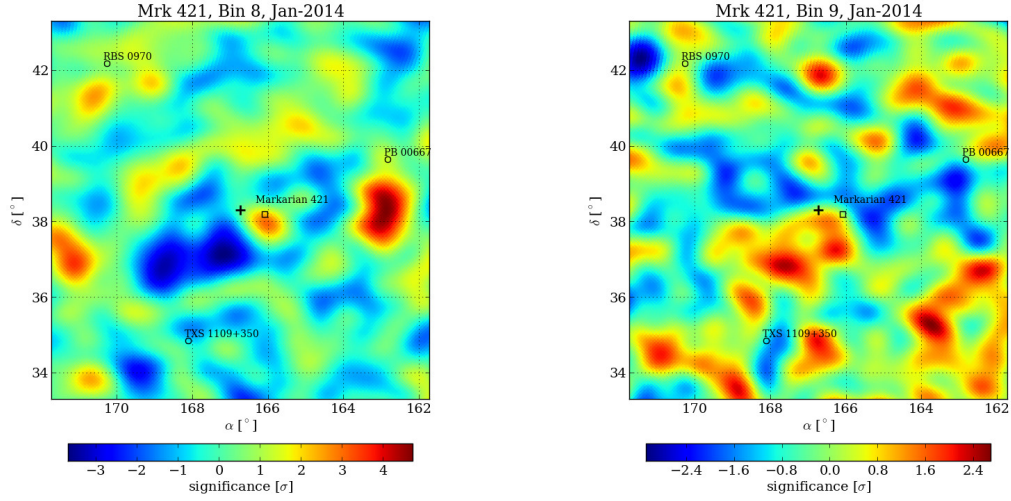


Figura 4.17: Mapas de significancia de Markarian 421. Bin 8 & Bin 9.

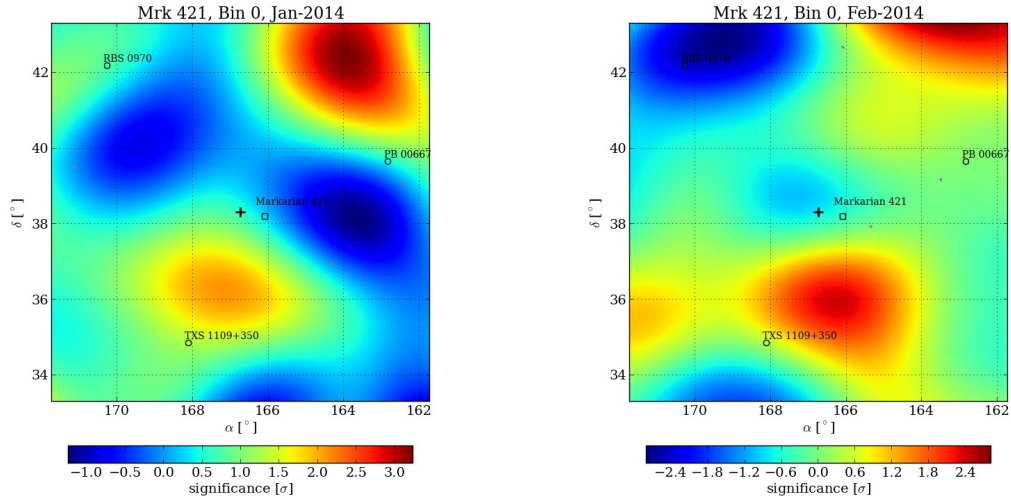


Figura 4.18: Mapas siderales en Bin 0 de Markarian 421 correspondientes a enero y febrero de 2014.

°Dec.).

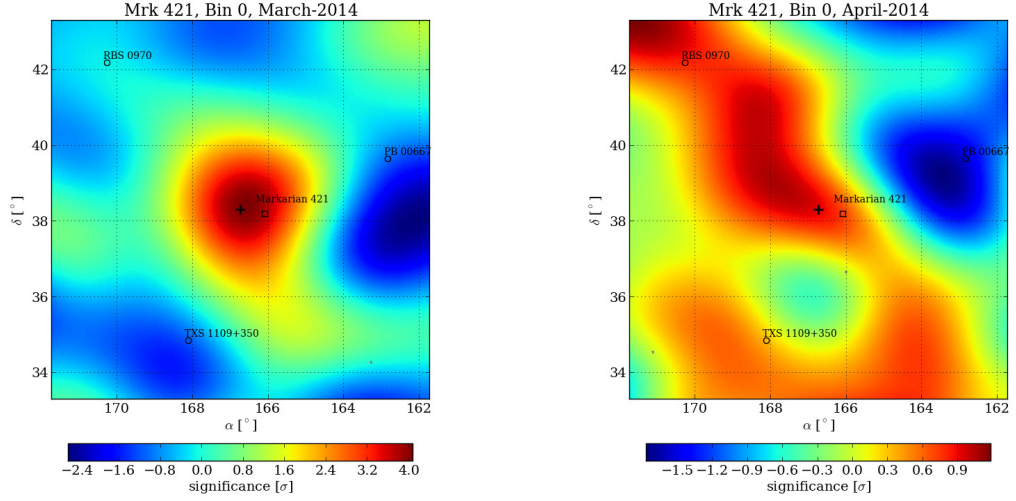


Figura 4.19: Mapas siderales en Bin 0 de Markarian 421 correspondientes a marzo y abril de 2014.

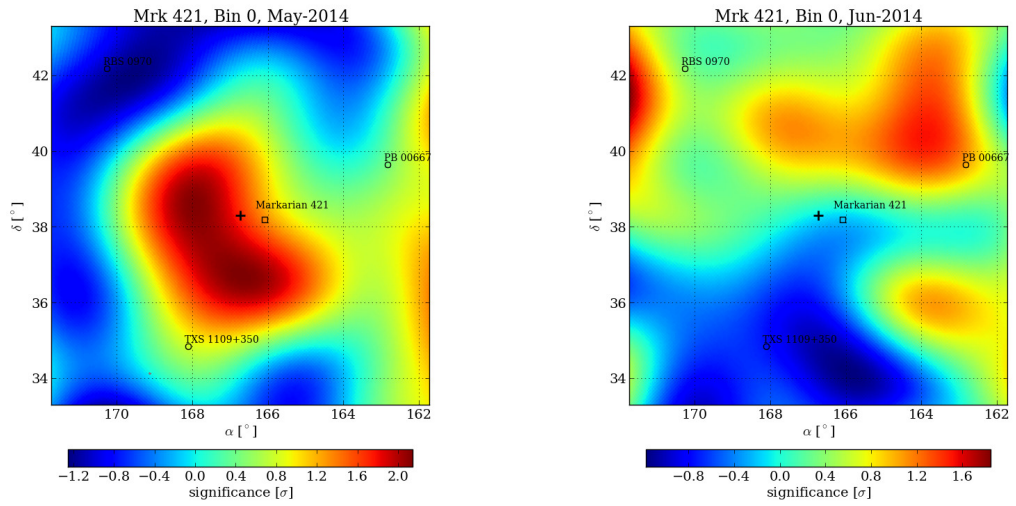


Figura 4.20: Mapas siderales en Bin 0 de Markarian 421 correspondientes a mayo y junio de 2014.



## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

### 4.2. OBSERVACIONES DE MARKARIAN 421

---

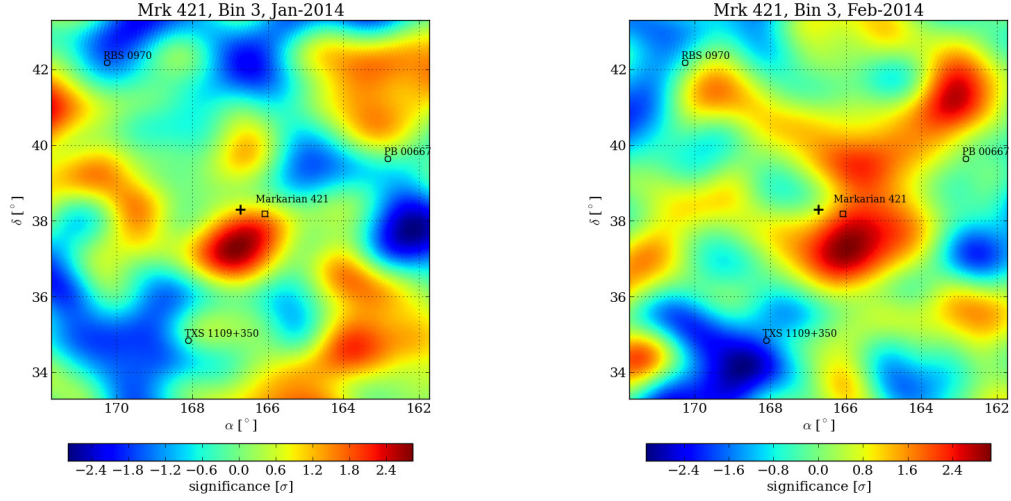


Figura 4.21: Mapas siderales en Bin 3 de Markarian 421 correspondientes a enero y febrero de 2014.

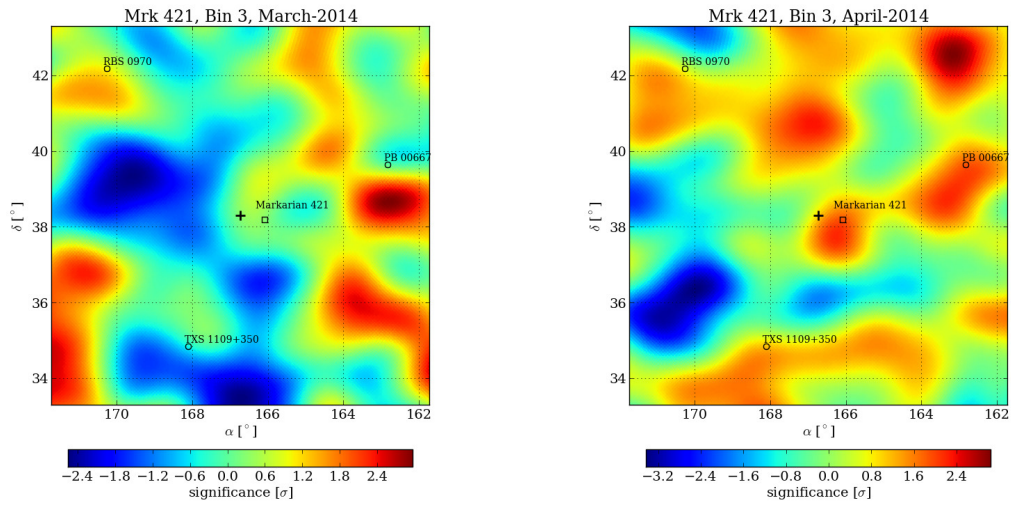


Figura 4.22: Mapas siderales en Bin 3 de Markarian 421 correspondientes a marzo y abril de 2014.

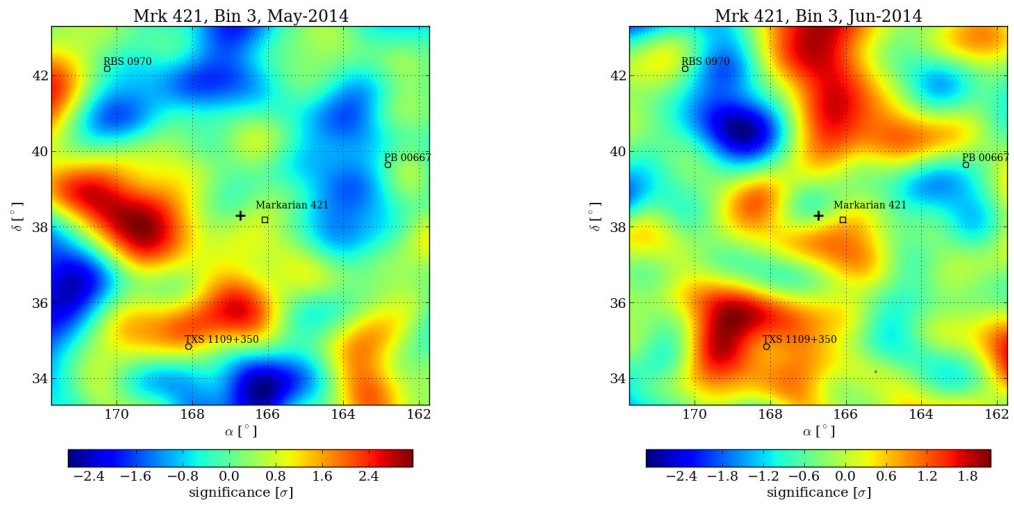


Figura 4.23: Mapas siderales en Bin 3 de Markarian 421 correspondientes a mayo y junio de 2014.

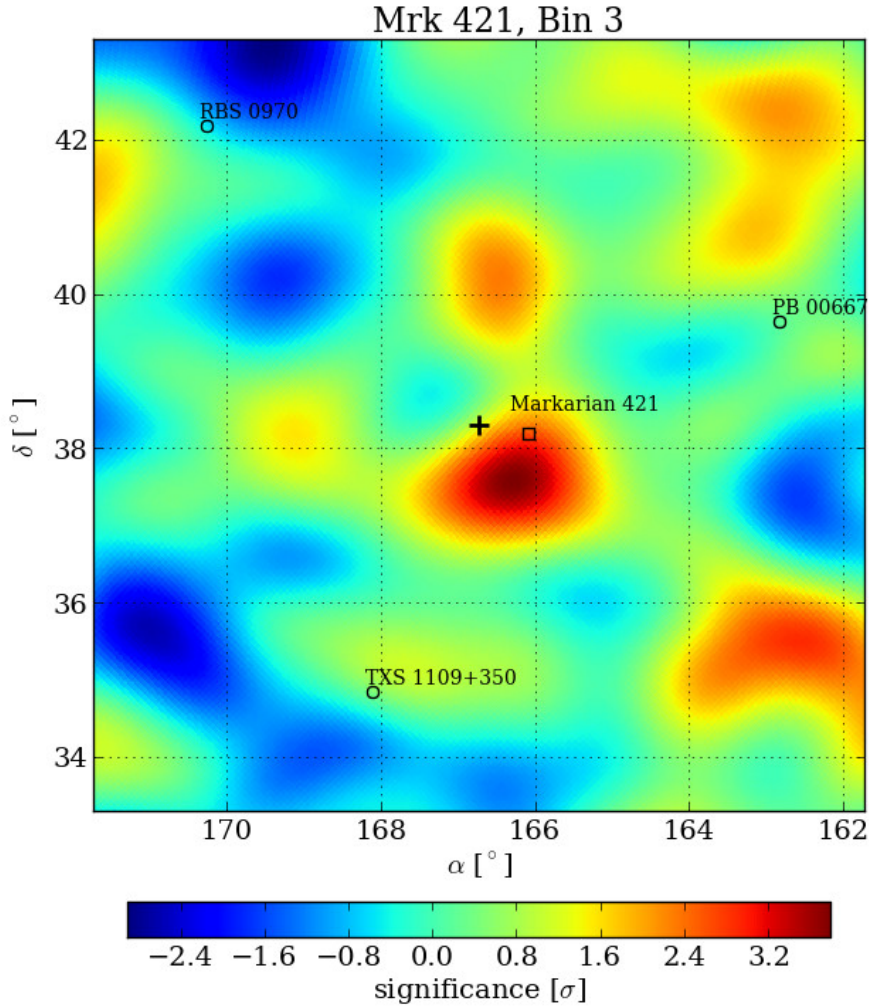


Figura 4.24: Mapa de significancia en rayos gamma centrado en la posición de Markarian 421 para el conjunto de datos correspondiente al primer semestre de 2014 (180 días). El código de color representa la significancia estadística del exceso de rayos gamma en cada punto. La significancia alcanzada es de  $3.8 \pm 1.2$  sigmas.

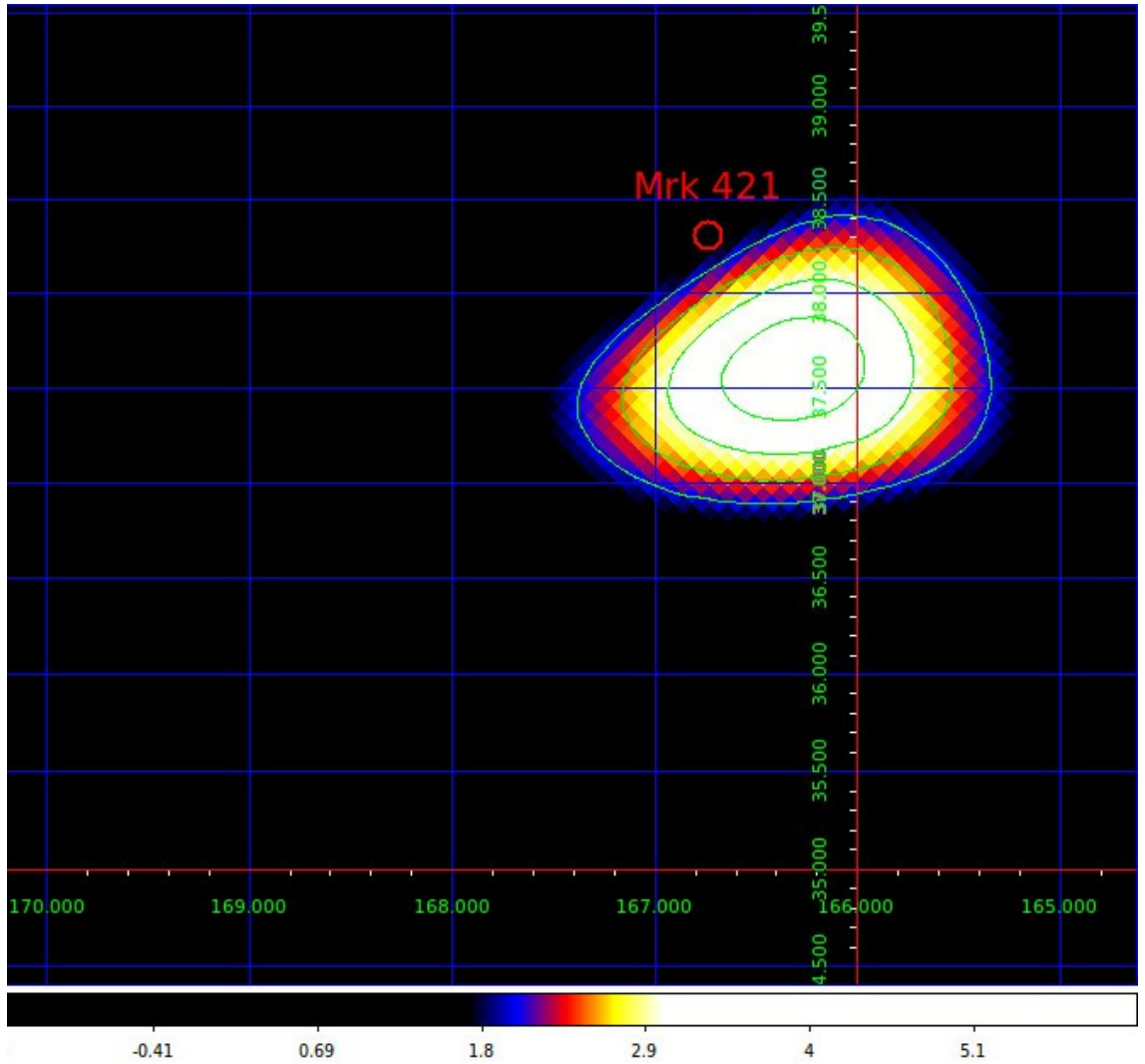


Figura 4.25: Imagen en rayos gamma de la región alrededor de Markarian 421 para el conjunto de datos correspondiente al primer semestre de 2014 (180 días). El código de color representa la significancia estadística del exceso de rayos gamma en cada punto. Las líneas en la figura representan las curvas de iso-significancia correspondientes a  $\sigma = 2, 2.5, 3, 3.5$  y  $3.8$  respectivamente. El círculo rojo representa la posición de Markarian reportada en TeV-Cat (166.73 A. R., 38.3 Dec.).



### 4.3. Curvas de Luz

Para los 180 días de observaciones se obtuvieron 26 mapas semanales y 6 mensuales. A partir de los mapas siderales, se extrae el valor de la significancia máxima en la vecindad del objeto de interés correspondiente a la región con mayor exceso de rayos gamma. La tabla 4.1 y 4.2 muestran los valores de significancia semanales y mensuales respectivamente de la Nebulosa del Cangrejo y Mrk 421.

| Semana | MJD<br>días | Cangrejo<br>( $\sigma$ ) | error<br>( $\sigma$ ) | Mrk 421<br>( $\sigma$ ) | error<br>( $\sigma$ ) |
|--------|-------------|--------------------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|
| 01     | 56664       | 0.27                     | 0.30                  | 2.90                    | 0.43                  |
| 02     | 56671       | 3.12                     | 0.62                  | 1.82                    | 0.83                  |
| 03     | 56678       | 1.27                     | 0.77                  | 1.51                    | 0.53                  |
| 04     | 56685       | 0.00                     | 0.33                  | 0.00                    | 0.27                  |
| 05     | 56692       | 2.59                     | 0.26                  | 1.22                    | 0.42                  |
| 06     | 56699       | 1.35                     | 0.35                  | 3.10                    | 0.97                  |
| 07     | 56706       | 1.80                     | 0.26                  | 2.53                    | 0.39                  |
| 08     | 56713       | 0.86                     | 0.56                  | 0.70                    | 0.33                  |
| 09     | 56720       | 2.10                     | 0.40                  | 1.30                    | 0.68                  |
| 10     | 56727       | 1.58                     | 0.48                  | 1.12                    | 0.24                  |
| 11     | 56734       | 3.02                     | 0.61                  | 0.58                    | 0.19                  |
| 12     | 56741       | 1.74                     | 0.17                  | 0.20                    | 0.76                  |
| 13     | 56748       | 1.75                     | 0.26                  | 1.38                    | 0.77                  |
| 14     | 56755       | 2.60                     | 0.39                  | 1.53                    | 0.33                  |
| 15     | 56762       | 3.24                     | 0.56                  | 1.33                    | 0.36                  |
| 16     | 56769       | 1.59                     | 0.40                  | 1.27                    | 0.74                  |
| 17     | 56776       | 2.31                     | 0.69                  | 1.25                    | 0.20                  |
| 18     | 56783       | 1.35                     | 0.30                  | 1.59                    | 0.56                  |
| 19     | 56790       | 0.00                     | 0.32                  | 1.21                    | 0.17                  |
| 20     | 56797       | 1.15                     | 0.45                  | 0.56                    | 0.20                  |
| 21     | 56804       | 2.10                     | 0.28                  | 0.19                    | 0.27                  |
| 22     | 56811       | 1.35                     | 0.35                  | 1.90                    | 0.61                  |
| 23     | 56818       | 1.98                     | 0.23                  | 0.89                    | 0.16                  |
| 24     | 56825       | 2.44                     | 0.52                  | 0.09                    | 0.24                  |
| 25     | 56832       | 1.09                     | 0.30                  | 0.80                    | 0.24                  |
| 26     | 56839       | 1.96                     | 0.39                  | 0.45                    | 0.62                  |

Tabla 4.1: Valores de significancia semanales de la Nebulosa del Cangrejo y Mrk 421.

| Mes     | MJD<br>días | Cangrejo<br>( $\sigma$ ) | error<br>( $\sigma$ ) | Mrk 421<br>( $\sigma$ ) | error<br>( $\sigma$ ) |
|---------|-------------|--------------------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|
| Enero   | 56689       | 3.02                     | 0.68                  | 2.70                    | 0.74                  |
| Febrero | 56717       | 2.56                     | 0.54                  | 2.48                    | 0.72                  |
| Marzo   | 56748       | 3.91                     | 0.68                  | 0.75                    | 0.35                  |
| Abril   | 56779       | 3.80                     | 0.41                  | 2.19                    | 0.69                  |
| Mayo    | 56809       | 0.88                     | 0.54                  | 0.93                    | 0.34                  |
| Junio   | 56840       | 3.40                     | 0.50                  | 1.03                    | 0.51                  |

Tabla 4.2: Valores de significancia mensuales de la Nebulosa del Cangrejo y Mrk 421.

Las gráficas 4.27 y 4.26 muestran la variabilidad semanal y mensual de los valores de significancia estadística (curva de luz) de la Nebulosa del Cangrejo.<sup>1</sup>

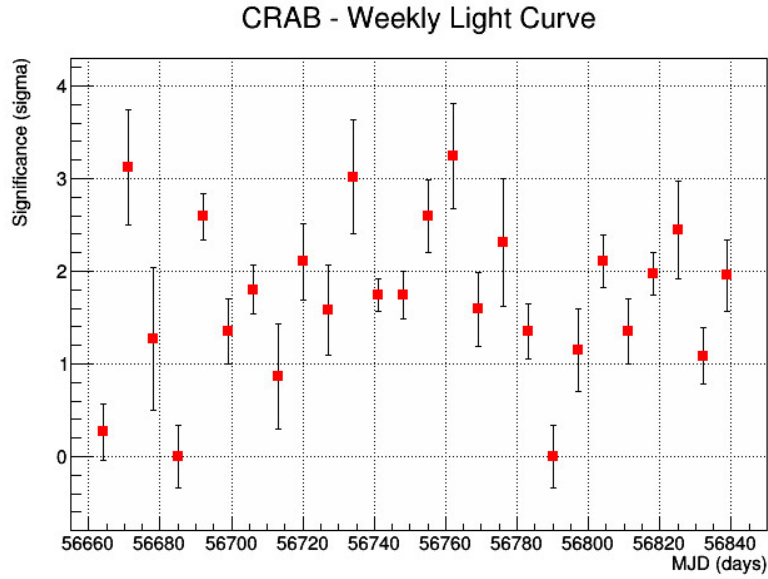


Figura 4.26: Curva de la significancia estadística de emisión de la Nebulosa del Cangrejo medida en intervalos de una semana. La significancia es obtenida de mapas generados con el Bin 3.

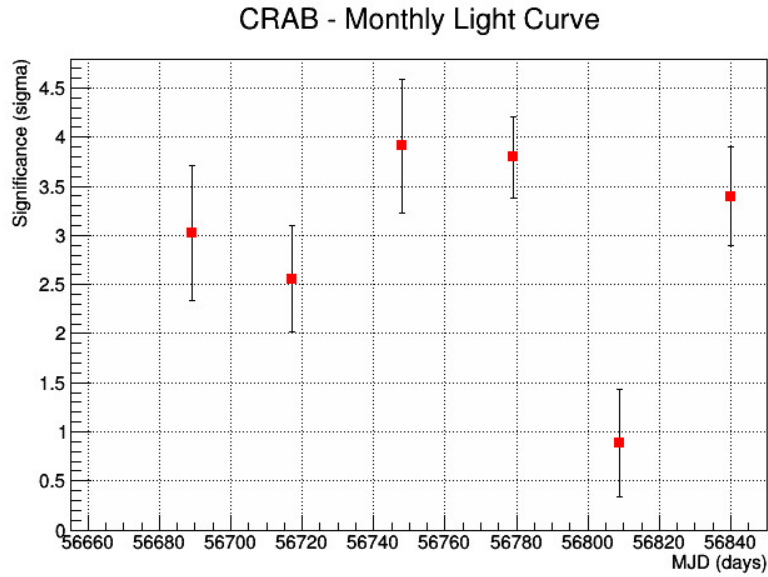


Figura 4.27: Curva de la significancia estadística de emisión de la Nebulosa del Cangrejo medida en intervalos de un mes. La significancia es obtenida de mapas generados con el Bin 3.

Las gráficas mostradas en 4.29 y 4.28 muestran la variabilidad mensual y semanalmente respectivamente de la significancia estadística (curva de luz) obtenida a partir de medir la significancia en el punto con mayor exceso de rayos gamma en la región de Markarian 421.

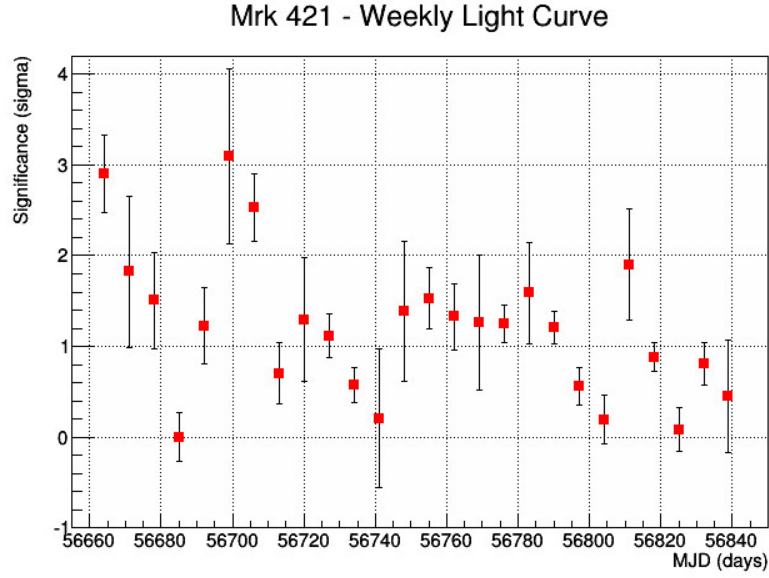


Figura 4.28: Curva de la significancia estadística de emisión de Markarian 421 medida en intervalos de una semana. La significancia es obtenida de mapas generados con el Bin 3.

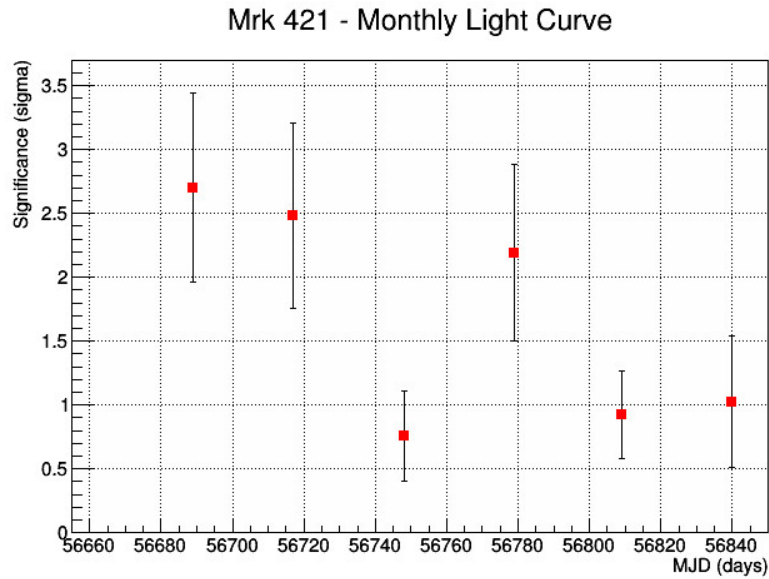


Figura 4.29: Curva de la significancia estadística de emisión de Markarian 421 medida en intervalos de un mes. La significancia es obtenida de mapas generados con el Bin 3.

## 4.4. Discusión de los resultados

A partir de la muestra de observaciones obtenida con HAWC-111, se han producido y examinado una colección de 320 mapas preliminares de todo el cielo; 260 semanales y 60 mensuales (32 mapas siderales por cada Bin de energía definido en 3.2). Después de analizar los datos del mes de enero 2014, la verificación de que las observaciones estaban dando los resultados esperados se confirmó con la detección de la Nebulosa del Cangrejo y Markarian 421 con significancias superiores a 2.5 sigma, ver figuras 4.8 y 4.21. Su detección reveló que la sensibilidad de HAWC-111 es apropiada para realizar un monitoreo continuo de la Nebulosa del Cangrejo y Markarian 421 por periodos de  $\sim 8$  horas diarias, a diferencia de los IACT's que solo pueden observar una fuente por periodos de  $\sim 30$  min [32] diarios.

Los mapas de significancia revelan que la Nebulosa y Markarian 421 registran el mayor número de eventos en el Bin 3 ( $nCh > 90$ ), ver figura 4.4 y 4.14. En bins más bajos y superiores a este, los resultados son dominados por fluctuaciones estadísticas, por lo que se eligió trabajar con los mapas obtenidos con el Bin 3; ya que resultó ser el más óptimo para monitorear éstos objetos. En este trabajo no se exploró la respuesta del detector en función del número de canales ( $nCh$ ), sin embargo se encontró que el Bin 3 es sensible a fotones provenientes del Cangrejo y Markarian. Este hecho abre la posibilidad de una futura calibración en flujo para el detector.

Se encontró que integrando las observaciones que conforman la muestra, la Nebulosa y alcanzan un valor de significancia de  $6.2 \pm 0.93$  sigmas y Markarian  $3.8 \pm 1.2$  sigmas. Este último resultado mostró que en los datos *reco-online* existe un error en el apuntado de al menos  $1^\circ$ . La figura 4.12 muestra que la detección del Cangrejo está desplazada  $+0.63^\circ$  en Ascensión Recta y  $+1.17^\circ$  en declinación con respecto a la reportada en la literatura, mientras que la figura 4.25 muestra que la detección de Mrk 421 está desplazada  $-0.42^\circ$  en Ascensión Recta y  $-0.74^\circ$  en declinación con respecto a la reportada.

Este error en el apuntado puede atribuirse a múltiples factores; errores sistemáticos en el proceso de reconstrucción y de alineación cenital, y la baja eficiencia del detector para observar fuentes con grandes distancias cenitales. Este último es más pronunciado en Mrk 421, ya que el objeto alcanza una distancia cenital de  $\sim 30^\circ$  en su punto más alto, a diferencia del Cangrejo, que en su punto más alto está a  $\sim 13^\circ$  del cenit.

Durante el primer semestre de 2014, se encontró que el promedio de significancia para el Cangrejo en el Bin 3 es de  $1.7\sigma$ /semana y de  $2.95\sigma$ /mes, en tanto que para Mrk 421, sus significancias

son de  $1.15\sigma$ /semana y de  $1.46\sigma$ /mes.

El día 10 de Marzo de 2014 (MJD 56726), el telescopio FERMI-LAT reportó vía el sistema de alertas *The Astronomer's Telegram* [55], que la Nebulosa del Cangrejo presentaba un incremento en la actividad de rayos-gamma en un factor de dos por encima del flujo promedio en la banda de 1-300 GeV (ATel #5971)[31]. HAWC por su parte, registro un incremento de  $3.02\sigma$  en la semana del evento (semana 11), 1.8 veces el valor de la significancia promedio, ver gráfica 4.26. Con este evento se podría pensar en una posible correlación entre los dos eventos. Cuatro semanas después, en la semana sideral 15 (MJD 56762), esto es, alrededor de la segunda semana de abril, HAWC registro un exceso de  $3.24\sigma$  en la región del Cangrejo; 1.9 veces el valor del valor promedio de la significancia, sin embargo en el sistema de alertas no se reporto ningún aumento en la actividad.

En lo que respecta a Markarian 421, no se tuvo ningún reporte de actividad relevante en el sistema de alertas, aunque, su curva de luz TeV semanal mostró un incremento de  $3.1\sigma$  en la sexta semana (MJD 56706) de monitoreo, 1.95 veces arriba de la significancia promedio ver figura 4.28.

En análisis preliminares de verificación con nuevas reconstrucciones (*reco-offline*) presentados a finales de septiembre de 2014 ([50]), se encontró que integrando 260 días de observación de HAWC-111 y combinando los mapas correspondientes a cada bin en un mapa único, se alcanza un valor de 15 en la significancia en la región de la Nebulosa del Cangrejo 4.30.

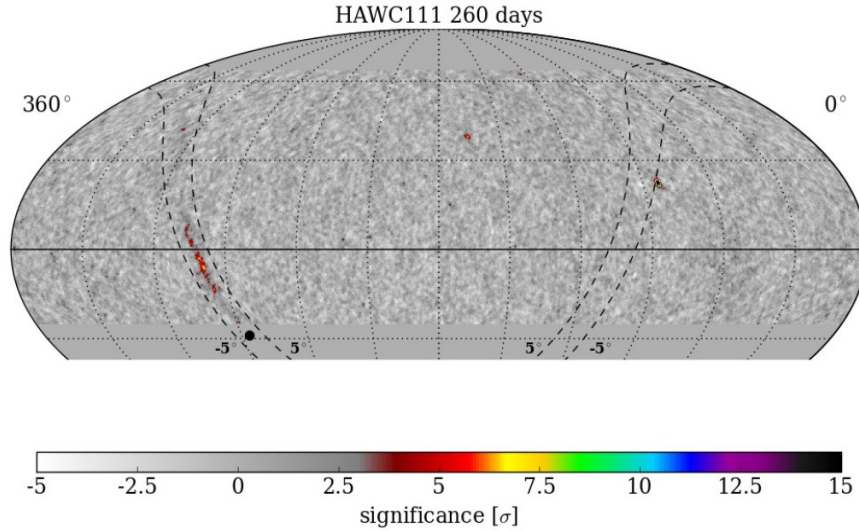


Figura 4.30: Mapa de la significancia estadística del cielo observado por HAWC-111 a lo largo de 260 días combinando los mapas de significancia de todos los bines [50]

Con datos más recientes de HAWC-200 y HAWC-250, se han obtenido la curva de luz preliminar



de Mrk 421 4.31 con una escala de observación de días [44], lo que hace posible seguir con mayor detalle la variabilidad de un AGN.

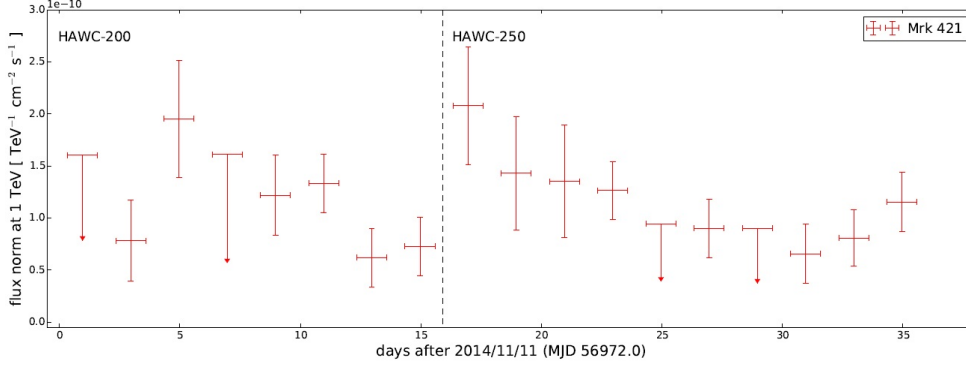


Figura 4.31: Curva de Luz preliminar de Mrk 421 obtenida a partir de datos tomados en noviembre-diciembre de 2014 con HAWC [44], mientras la configuración del detector cambio de 200 a 250 WCD's. Cada medición representa la integración de dos tránsitos de la fuente.

En la proyección del trabajo a futuro, está considerar las nuevas reconstrucciones *offline*, así como los nuevos datos obtenidos por HAWC-300 para mejorar y ampliar los resultados de las curvas de luz de los objetos seleccionados.

## Capítulo 5

# Conclusiones

Se analizó una muestra masiva de datos correspondiente a las observaciones del cielo TeV realizadas con la tercera etapa de operaciones del Observatorio de Rayos-Gamma HAWC (111 WCDs), en el periodo de Enero a Junio de 2014. Con ésta muestra de datos, se ha obtenido una colección de 320 mapas preliminares de todo el cielo con diferentes escalas de integración y distintos cortes de energía.

Los resultados revelan que los objetos más brillantes durante este periodo son la Nebulosa del Cangrejo y la Galaxia Markarian 421; dos fuentes bien establecidas como las más intensas en el régimen TeV. Un exceso de  $6.2\sigma$  fue observado en la posición de la Nebulosa del Cangrejo, superando los 3 años de operación de MILAGRO, el antecesor de HAWC. Además de la detección de la Nebulosa del Cangrejo y Markarian 421, no se encontraron otras emisiones significativas en las posiciones de objetos ya catalogados como emisores TeV.

La Nebulosa del Cangrejo y Markarian 421 son los objetos celestes más estudiados en astrofísica, sin embargo no se tienen estudios previos de su variabilidad a muy altas energías. El gran campo de visión de HAWC y su amplio ciclo de trabajo han permitido realizar uno de los primeros monitoreos TeV de éstas fuentes. A partir del conjunto de mapas generados, se han obtenido curvas de luz (curvas de significancia estadística) semanales y mensuales de la Nebulosa del Cangrejo y Markarian 421. Estos resultados preliminares representan uno de los primeros trabajos de monitoreo de la Nebulosa del Cangrejo y de la Galaxia Activa Markarian 421 en el régimen de 0.1-100 TeV y complementan los estudios obtenidos en diferentes rangos de energía que van desde el infrarrojo hasta los 0.3 TeV, además de que proveen información para el estudio y la comprensión de los

objetos más energéticos conocidos en el Universo.

Los resultados obtenidos en este estudio aún son preliminares, dado que los datos fueron obtenidos con una etapa de operación del detector y procesados con herramientas de análisis en fase de prueba. La perfeccionamiento en el proceso de discriminación de eventos, la mejora en los programas de análisis, así como el eventual aumento del área efectiva del detector, incrementaran la calidad de las observaciones y la posibilidad de nuevos descubrimientos.

La construcción del detector en su fase de 111 WCDs es importante en vista de que el área de detección es tres veces mayor a la de MILAGRO. La confirmación de la detección de la Nebulosa del Cangrejo y Markarian 421 por HAWC-111 indica que las configuraciones parciales del detector funcionan adecuadamente, incluso antes de la consumación del arreglo. En este trabajo se contribuye en las tareas de validación del desempeño del arreglo y en la verificación de los algoritmos de reconstrucción, además de realizar un estudio de fuentes TeV notables.

Para estudiar la variabilidad de emisión de la Nebulosa y de Markarian en detalle, es necesario un monitoreo continuo. El perfeccionamiento y la implementación de nuevos algoritmos de análisis en los datos obtenidos con los arreglos HAWC-250 y HAWC-300 son necesarios para la continuación del trabajo hecho en esta tesis.

# Bibliografía

- [1] Abeysekara, A. U., et al. *Astroparticle Physics*, (2014), Volume 62, p. 125-133.
- [2] Abdo, A., A. “Discovery of Localized TeV Gamma-Ray Sources and Diffuse TeV Gamma-Ray Emission From The Galactic Plane With MILAGRO Using a New Background Rejection Technique”. PhD Thesis. Michigan State University, (2007).
- [3] Abdo, A., A., et al., *ApJL* 700 (2009) L127–L131.
- [4] Abdo, A., A., et al., *Science* 331 (2011) 739.
- [5] Abeysekara, A. U., *APh* (2012) 35..641A.
- [6] Abraham, J., et al., (2003) DOI: 10.1016/j.nima.2003.12.012
- [7] Aharonian, F. A., Coppi, P.S., Voelk, H.J., *ApJL* 423 (1994) L5–L8.
- [8] Aharonian, F. A., *New Ast. Rev.* 5 (2000) 377–395.
- [9] Aleksić, J., et al., *arXiv:1406.6892v3* (2015).
- [10] Aharonian, F. A., et al., *A&A* 390 (2002) 39–46.
- [11] Aharonian, F. A., *Very High Energy Cosmic Gamma Radiation: a Crucial Window on the Extreme Universe*, World Scientific Publishing, River Edge, NJ, (2004).
- [12] Aharonian, F. A., et al., *ApJ* 636 (2006) 777–797.
- [13] Amenomori, M., et al., *ApJ* (1999) 525, 93A
- [14] Amenomori, M., et al., *ApJ* 692 (2009) 61–72.
- [15] ARGO-YBJ Experiment. <http://argo.na.infn.it/>

- [16] Arons, J.. (2012) Sp.Sci.Rev., in press.
- [17] Atkins, R. A., et al., ApJ (2000) 533, L119.
- [18] Atkins, R. A., et al. ApJ (2003) 595, 803A.
- [19] Atkins R. A., et al. ApJ (2004) 608 680.
- [20] Bartoli, B., et al. ApJ 779 (2013).
- [21] Baughman, B. Technical Note Number 38. HAWC Collaboration, (2014).
- [22] Biller, S.D., et al., Phys. Rev. Lett. 83 (1999) 2108–2111.
- [23] Buehler, R., et al. ApJ (2012) 749, 26.
- [24] Carrigan, S., et al., arXiv:1307.4868 (2013).
- [25] Chaty, S., (2010), arXiv:1005.0100.
- [26] D’Elia, V., et al. A&A (2013) 551A.142D.
- [27] Di Sciascio, G., for the ARGO-YBJ Collaboration. ArXiv: 1107.3404, (2011).
- [28] Fiorino, D., Technical Note Number 12. HAWC Collaboration (2014).
- [29] Gabici, S., Aharonian, F. A., Ap& SS 309 (2007) 465–469.
- [30] Gaidos, J.A., et al. (1996), Nature, 383, 319.
- [31] Gasparrini, D., Buehler, R., 2014. The Astronomer’s Telegram, #5971.
- [32] Grube, J., Observations of the Crab Nebula with the Whipple 10 m Telescope. VERITAS Collaboration. arXiv:0709.4300 (2007).
- [33] Goodman, J., & Braun, J. (2011) Proceedings of the 32th ICRC, 9, 159.
- [34] Hartman, R.C., et al., ApJS, (1999) 123, 79.
- [35] Hays, E., “A Search for TeV Emission from Active Galaxies using the Milagro Observatory”, PhD Thesis, Maryland University, (2004).
- [36] HAWC. Observatorio de Rayos Gamma . <http://www.hawc-observatory.org/>

- [37] HEALPix. <http://healpix.jpl.nasa.gov/>
- [38] H.E.S.S. Collaboration, *Astropart. Phys.* 34 (2011) 738–747.
- [39] Hillas, A. M. *Proc. 17th Int. Cosm. Ray Conf.* 8, 193 (1981).
- [40] Hofmann, W., H.E.S.S. Collaboration. (2003), *Proceedings of the 28th ICRC*, p. 2811–2814.
- [41] Image Reduction and Analysis Facility. <http://iraf.noao.edu/>
- [42] Kelley-Hoskins, Nathan C., “Calibration of the HAWC Gamma-Ray Observatory”, Master’s Thesis, Michigan Technological University, (2012).
- [43] Krawczynski et al., *ApJ* 601 (2004) 151–164.
- [44] Lauer, R., HAWC Collaboration Meeting. January 14th, 2015.
- [45] Li, T. P. and Ma, Y. Q., (1983), *ApJ*, 272, 317.
- [46] Martínez, M., et al., (2003), *Proceedings of the 28th ICRC*, p. 2815–2818.
- [47] McKay, T. A., et al., *ApJ* 417 (1993) 742.
- [48] NASA’s Great Observatories’ View of the Crab Nebula. <http://www.spitzer.caltech.edu/images/2857-sig09-009-NASA-s-Great-Observatories-View-of-the-Crab-Nebula>
- [49] Punch, M., et al., *Nature* 358 (1992) 477.
- [50] Salesa, F., HAWC Verification Call. September 23th, 2014.
- [51] Sinnis, G., Smith, A., *arXiv:astro-ph/0403096* (2004).
- [52] Sinnis, G. Air shower detectors in gamma-ray astronomy, *New J. Phys.* 11 (2009) 055007.
- [53] Striani, E., et al., *ApJL* 741 (2011) L5.
- [54] Online Gamma-Ray Source Catalog. <http://tevcat.uchicago.edu/>
- [55] The Astronomer’s Telegram. <http://www.astronomerstelegam.org/>
- [56] Urry, M. C. & Padovani, P., (1995), *PASP*, 803, 107.



- [57] The HESS Source Catalog <http://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/HESS/pages/home/sources/>
- [58] The 2 Year Fermi-LAT Sources Catalog (2FGL) <http://www.asdc.asi.it/fermi2fgl/>
- [59] Tibet AS-gamma Experiment. <http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/em/>
- [60] Vernetto, S., *Astropart. Phys.* 13 (2000) 75–86.
- [61] Vernetto, S., arXiv:1307.7041. (2013)
- [62] Weekes, T. C., et al., *ApJ* 342 (1989) 379–395.
- [63] Weekes, T. C., et al., *Astroparticle Physics*, (2002) 17, 221.
- [64] Wilson-Hodge, C. A., et al., *ApJL* 727 (2011) L40.
- [65] Yoshikoski, T, et al., *Astroparticle Physics*, (1999) 11, 267.
- [66] Zhou, H. Hui, C., M., Technical Note Number 32. HAWC Collaboration, (2013).